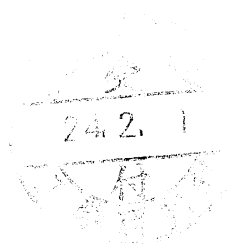


平成 23 年度 修士学位論文

造船における溶接支援装置の開発

指導教員 池浦良淳 教授



三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
システム設計研究室
長田 大

目次

| | |
|------------------------------|----|
| 目次..... | i |
| 第 1 章..... | 1 |
| 序論..... | 1 |
| 1.1 研究背景..... | 1 |
| 1.2 研究目的..... | 5 |
| 1.3 本論文の流れ..... | 5 |
| 第 2 章..... | 6 |
| 作業環境および作業動作の解析 | 6 |
| 2.1 研究対象とする作業..... | 6 |
| 2.2.1 作業動作の計測機器..... | 7 |
| 2.2.2 従来作業情報収集実験の目的 | 11 |
| 2.2.3 従来作業情報収集実験の環境 | 11 |
| 2.2.4 従来作業動作計測実験の条件 | 13 |
| 2.3.1 従来作業動作の解析..... | 13 |
| 2.3.2 関節角度の導出..... | 17 |
| 2.3.3 BlessPro による負担評価 | 18 |
| 2.3.4 従来作業の肉体的負担の主観評価 | 24 |
| 2.3.5 肩関節周りのトルクの再評価 | 25 |
| 第 3 章..... | 28 |
| 上向き溶接支援装置の設計と製作 | 28 |
| 3.1 設計の構想..... | 28 |
| 3.2.1 支援装置に要求される条件 | 28 |
| 3.2.2 支援装置の形状..... | 29 |
| 3.3.1 機構設計..... | 31 |

| | |
|------------------------------|-----------|
| 3.3.2 ゼンマイばねの選定..... | 32 |
| 3.3.3 ばねケース, ケースカバーの選定 | 34 |
| 3.3.4 ピニオン, ラックの選定 | 36 |
| 3.3.5 スライドレールの選定..... | 38 |
| 3.3.6 軸の選定..... | 40 |
| 3.4.1 支援装置の全体設計..... | 42 |
| 3.4.2 肘置き部の設計..... | 42 |
| 3.4.3 ロッドの選定..... | 44 |
| 3.4.4 本体・ベルト固定具の製作 | 45 |
| 3.5 支援装置の組み上げ..... | 46 |
| 第 4 章 | 47 |
| 提案装置評価のための試行実験 | 47 |
| 4.1.1 表面筋電位に関して..... | 47 |
| 4.1.2 作業に関わる筋..... | 48 |
| 4.1.3 EMG 計測機器..... | 48 |
| 4.2.1 提案装置評価実験の目的 | 48 |
| 4.2.2 提案装置評価実験の環境 | 48 |
| 4.2.3 提案装置評価実験の条件 | 53 |
| 4.3.1 表面筋電位の解析..... | 53 |
| 4.3.2 作業に与える影響の評価 | 59 |
| 4.3.3 提案装置試用による主観評価 | 63 |
| 第 5 章 | 67 |
| 結論 | 67 |
| 5.1 まとめ..... | 67 |
| 5.2 今後の課題..... | 68 |
| 参考文献 | 69 |
| 謝辞 | 71 |

第1章

序論

1.1 研究背景

大量の物資を一度に運ぶことができる船舶が低コストの輸送の一つの手段として貿易活動を促進してきた¹⁾。輸送コストを下げるために、大量の物資を少人数で高速かつ、燃費の良い船を安く作ることが求められている。そのため、造船業界では多様な用途の船舶を提供しながらも、船舶の大型化や高速化に力を注いできた。大型の船舶は大量の鋼材を用いて船体を形成しているため、船舶や海洋構造物における鋼材の使用量は他の機械や構造物と比べ多い²⁾。鋼材の接合方法には溶接が用いられており、溶接距離や形状も様々な溶接作業が行われる。造船所における溶接の自動化は着実に進んでいる^{3),4)}。その一方で手溶接の割合は70%以上と高く自動化が進んでも手溶接への依存度は高い傾向は容易には変えられないと考えられる^{4),5)}。これは船体の中でも狭小な箇所への自動溶接機の設置が能率的でないことや、天候による温度差、材料の収縮と膨張を考慮した電流の調整や溶接速度の決定など、溶接機の施工条件の設定が難しく熟練した溶接工の作業精度に至らないことが一因である。また、船体の中央部などの大きな重量を受ける部分において、船体強度を確保するために使われる鋼材は厚いものでなくてはならない。一般的に、溶接ではある一定の板厚を超えた場合は厚板に対する作業は溶接難易度が高くなる傾向があり、板が厚いことにより継ぎ目の溶接の盛数が増えることになる⁵⁾。熱による影響も大きくなり歪みの問題も考慮しなければならない上に、溶け込み不足、ブローホールなどの欠陥が生じやすくなる⁶⁾。これらの溶接欠陥は船体の強度を損なうために修正を行わなければならないが、その作業は主に溶接工が半自動溶接機を用いて手動にて行う。しかしながら、溶接作業は

暑熱の問題や要求される精度の高さを満たすべく、苦しい作業姿勢を維持するなど、一種の職業病として腰や膝、肩などに負担を訴える作業者が多く決して楽な作業ではない。特に頭上に溶接対象が設置され、上向きで行う作業は身体への負担が高く、長時間の作業が困難なものの一つである。奥本らが溶接作業者に対して行った肉体的な負担調査では、上向き・立向き・横向き・下向きの4種類の作業の中で上向き姿勢での作業が最も負担が大きいと報告されている⁷⁾。近年の急速に進む少子高齢化に伴い、適正な能力を有する労働力が減少している。高齢者がこれまで以上に活躍する必要があり、溶接などの熟練を要する作業では、その技能や知識は貴重なものであるため、造船業でも高齢者雇用を促進するべく活動している⁸⁾。このように企業が労働力を確保するには、肉体的負担を理由として現場を離れる作業従事者を減らすことが重視されている。暑さ対策としては、Fig.1.1 に示す小林らによるファン付き作業ウェアの空調服がある⁹⁾。また、力のアシストにより肉体的負担を軽減する方法の一つとしてパワーアシスト装置の導入が挙げられる。山海らは Fig.1.2 に示す減速機付き電動アクチュエータを用いたロボットスーツ HAL を開発した¹⁰⁾。小林らは Fig.1.3 に示すコンプレッサからの空気圧により駆動する人工筋肉を用いて肉体労働者の負担を軽減するマッスルスーツを開発した¹¹⁾。八木らは果物の収穫作業時に想定される上向きおよび中腰作業の動作をアシストする電動アクチュエータや空気圧ロータリアクチュエータを用いた支援装置を開発している¹²⁾。パワーアシスト装置では、長時間作業への対応やアシスト力の確保のためには、動力供給に配線やバッテリー搭載が必要となるが作業の機動性を損なってしまう。そのため、外部からの動力供給を必要とせず、小型で携帯性に優れた作業支援装置が求められている。その一例として、北村らは Fig.1.4 に示す、形状記憶合金の復元力を利用して上腕と首に付勢力を与え上向き作業支援装置を開発した¹³⁾。しかし、造船所内での溶接作業の支援を想定したものではなく、作業道具の重量が重いためアシスト力が不足するという課題がある。

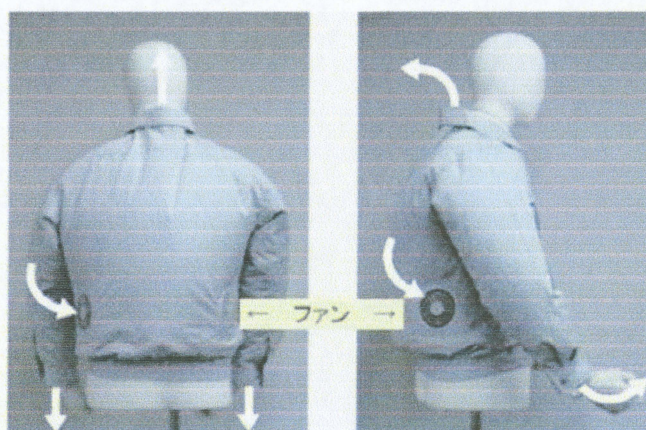


Fig.1.1 空調服



Fig.1.2 ロボットスーツ HAL



Fig.1.3 マッスルスーツ



Fig.1.4 ぶどう摘粒等の作業支援装置 グレイパー

1.2 研究目的

本研究では、バネの復元力を動力源に用い、外部動力の供給が不要な溶接支援装置を提案し上向き作業を行う溶接工の肉体的な負担を改善することによる作業効率向上を目的とした。なお、本研究の対象とする作業は、作業場所の移動を必要とし、作業姿勢の中で肉体的負担が最も高いとされる上向き作業とした。

1.3 本論文の流れ

本論文の構成を以下に示す。まず、第2章では溶接支援装置開発のための情報収集実験について述べる。第3章では第2章で収集した情報から適切な支援方法を考案し、それに基づいた支援装置の設計製作について述べる。第4章では開発した支援装置の評価のための実験について述べる。最後に、第5章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

第2章

作業環境および作業動作の解析

適切な溶接支援装置の開発を行うためには、作業を行う周辺の環境情報の収集や、作業方法や作業動作について知ることが重要である。本章では、本研究の対象とする作業環境について紹介し、作業動作を明らかにする。2.1 節では作業環境について述べる。2.2 節では、作業動作の計測装置について述べる。2.3 節では、作業動作計測実験の内容について述べる。

2.1 研究対象とする作業

本研究の対象とする造船所内の作業環境として、溶接対象とする製造工程における組立途中の船体は地面から場所により異なり 1800mm から 2000mm の位置に設置されている。設置する高さによって作業者は個々の体格に合わせて作業台に乗って作業を行う。溶接対象は平面で傾きは無い。直線の溶接線が作業の対象となり、これは自動溶接機によって一度溶接が行われたあとの溶接不良が生じた箇所を手作業で修正する工程である。作業者は船体と地面との間の空間で作業を行う。その作業環境を Fig.2.1 に示す。地面は平坦であり、作業に用いる機器を載せた台車が置かれ、所々にケーブル類がある。これは作業道具と接続されており、電源の供給を担う。また、船体を地面から浮かして設置するための支柱が複数配置されている。強い発光や飛び散る火花などから身体を守るために遮光マスク、ヘルメットや手袋などの保護具を着用している。Fig.2.2 には一例として作業者を紹介する。また、対象とする作業として、その作業時の姿勢を Fig.2.3 に示す。溶接不良が生じた箇所を除去する目的で行うガウジング作業、除去後、接合を行う溶接作業、最後に溶接した箇所を研磨し凹凸を無

くす研磨作業である。この作業は一連の流れとして一人の作業者が行う。いずれの作業も作業者の正面を進行方向して作業を行う。また、一連の作業には含まれないが同じ環境で行う溶接動作には横方向を進行方向とする作業が存在する。対象とする作業で扱う一般的な作業道具を Fig.2.4 に示す。Table.2.1 にその重量を示す。作業道具にはそれぞれケーブルが接続されている。道具の重量には作業を行う高さまで道具を持ち上げた時に作業者が支持しなければいけないケーブルの重さを含めている。

2.2.1 作業動作の計測機器

計測は NDI 社製の光学式三次元動作解析装置(モーションキャプチャ)「OPTOTRAK CERTUS」を用いて行った。OPTOTRAK CERTUS は赤外線を発光するマーカを付けた状態で動作を行い、Fig.2.5 に示す赤外線発光マーカから発光された赤外線を3個の赤外線受光センサ(Fig.2.6)で受光し、各センサの情報より各マーカの位置計測を行う。OPTOTRAK CERTUS の仕様を Table.2.2 に、計測領域を Fig.2.7 に示す。なお、計測精度は赤外線受光センサから赤外線発光マーカの距離により変動するため、その距離が4mの時の値とした。



Fig.2.1 溶接作業環境

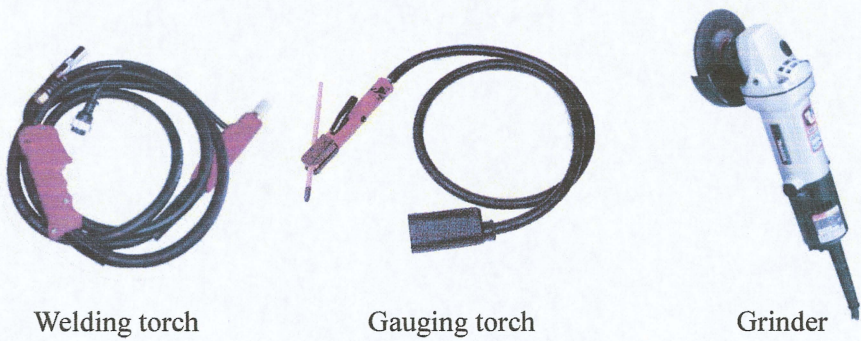


Fig.2.2 溶接作業者



(a)Gauging (b)Welding (c)Grinding

Fig.2.3 作業の種類



Welding torch Gauging torch Grinder

Fig.2.4 作業道具

Table.2.1 作業道具の重量

| The name of a tool | Welding torch | Gauging torch | Grinder |
|--------------------|---------------|---------------|---------|
| Weight | 1.8kg | 2.0kg | 2.4kg |

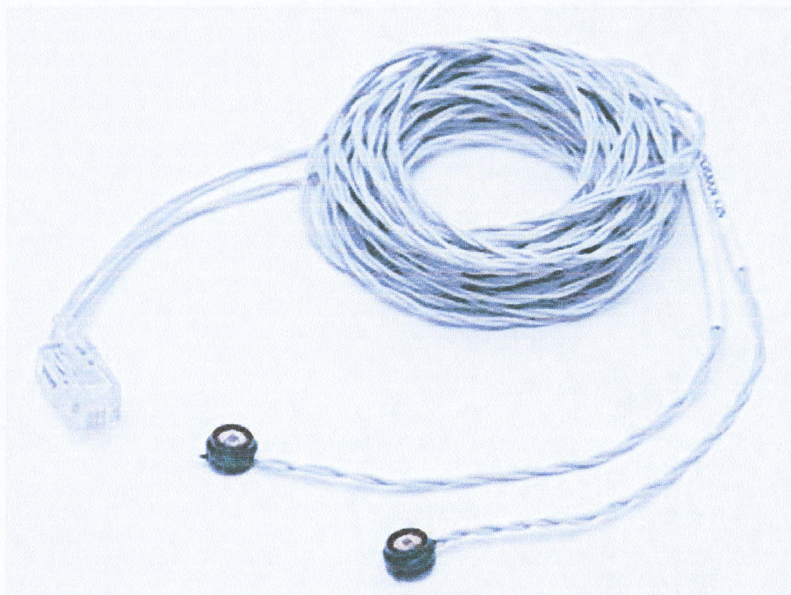


Fig.2.5 赤外線発光マーカ

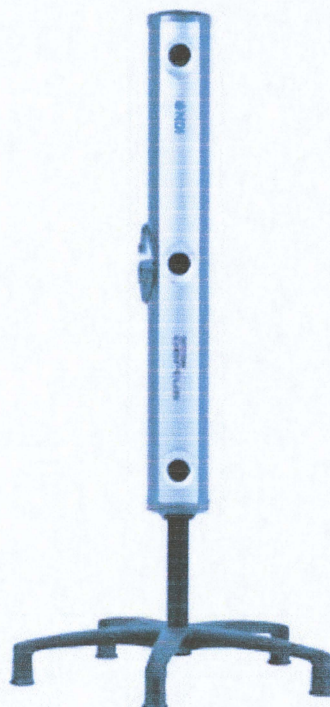


Fig.2.6 赤外線受光センサ

Table.2.2 OPTOTRAL CERTUS の仕様

| | |
|--|-----------------------|
| Maximum Number of Markers | 512 |
| Maximum Frame Rate N=number of markers | $4600/(N+2)\text{Hz}$ |
| Maximum Sampling Rates (Marker Frequency) | 4600 Hz |
| Accuracy | 0.3mm |
| Resolution | 0.01mm |

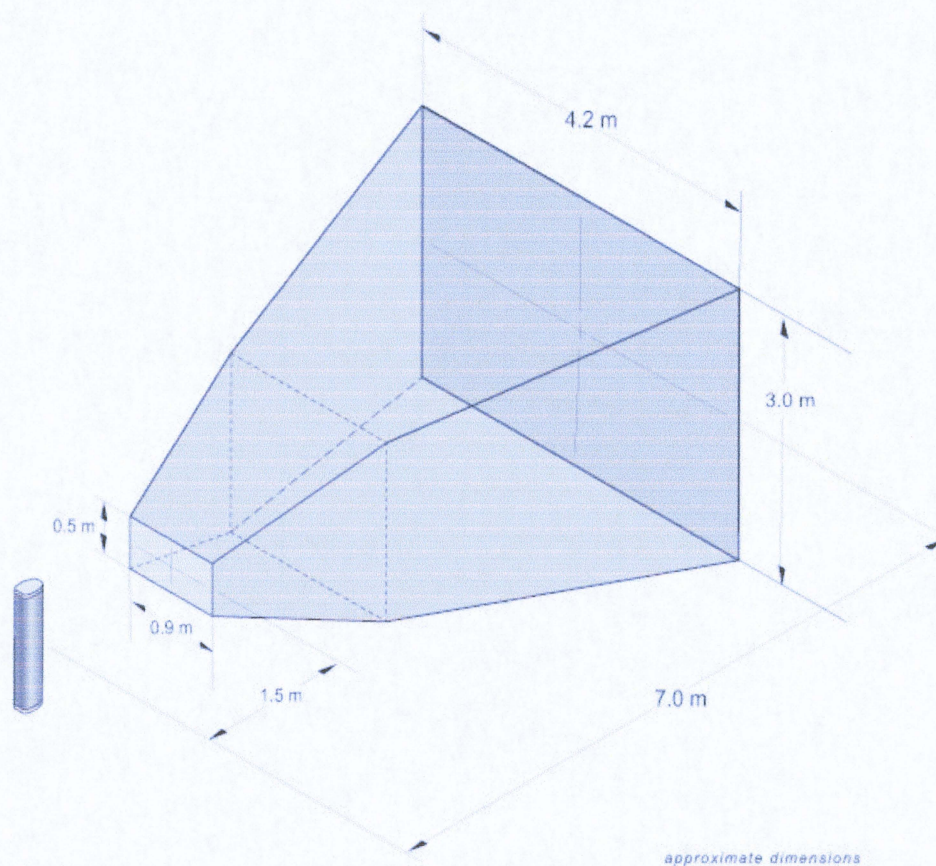


Fig.2.7 計測領域

2.2.2 従来作業情報収集実験の目的

本実験では、対象とする3つの作業に対して、作業を適切に支援することができる装置の機構を検討するために、作業の特徴となる動作および作業の動作範囲を明確にすること。そして、作業者の肉体的負担の大きな部位を特定することを目的とした。

2.2.3 従来作業情報収集実験の環境

実験は実際の作業を正確に計測するため、2.1 節で紹介した造船所内の作業現場で実施した。実験環境について、Fig.2.8 に示す。地面から溶接対象となる母材までの高さは 2000mm、作業者は高さ 300mm の作業台に乗って作業を行う。計測機器として 2.2 節で説明した OPTOTRAK CERTUS を用い、被験者の乗る作業台の左側面から 4m の距離に赤外線受光センサを地面と垂直になるように設置した。赤外線受光センサは中央のセンサを座標原点として位置情報を収集した。センサから計測対象方向が正方向となる Z 軸、被験者の前後方向を X 軸とし、後ろ方向にとり、地面に垂直に Y 軸をとし、上方向を正とした。Fig.2.9 に動作計測のために作業者と作業道具に取り付けた赤外線発光マーカの配置を示す。取り付け位置は作業道具の握り手と先端部の2箇所、作業者の身体側面の頭、こめかみ、中指節点、手首、肘、肩、腰、膝、踝、爪先の10箇所、合計12箇所であり、作業者は作業道具を主に利き腕で扱うために利き腕側の側面の情報を収集するようにしている。

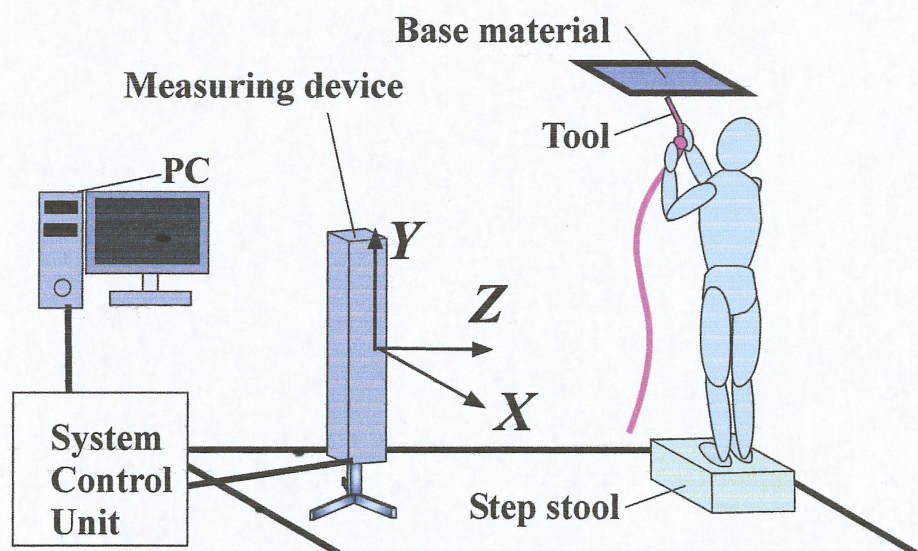
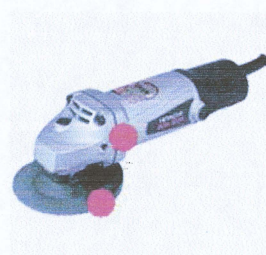


Fig.2.8 実験環境



(a) 作業者



(b) 作業道具

Fig.2.9 マーカ配置

2.2.4 従来作業動作計測実験の条件

造船所で働く溶接作業従事者一名を被験者として計測を行った。被験者情報を Table.2.3 に示す。対象とする作業の中で溶接作業とガウジング作業は動作が似ているため、計測動作は作業の方向の異なる溶接作業を2種類と研磨作業の合計3種類とした。各作業に対して15秒間作業情報をサンプリングタイムは10msecとして3回ずつ計測した。なお、作業に伴う火花などの発光は計測に悪影響を及ぼすと考え、被験者は通電していない作業道具を用いて実際の作業を想定した模擬作業を行った。

2.3.1 従来作業動作の解析

まず、各作業に最も重要と考えられる作業道具と、それを操作する腕の動きについてその動作軌跡の例として各作業の3回目の計測結果を Fig.2.10 から Fig.2.12 に示す。グラフは縦軸が X 軸[mm]を、横軸が Z 軸[mm]を表しておりこれは溶接対象に平行な面である。各グラフの縦と横の表示範囲は100mmに固定してある。(a)に道具先端、(b)に道具を支持するために手を添えている位置、(c)に中指節点、(d)に手首、(e)に肘、(f)に肩の作業中の動作軌跡を示している。まず、いずれの作業も異なる傾向の動作軌跡を示している。2つの溶接動作は規則正しく周期的で細かな動きを見せるのに対し、研磨作業は大きく前後運動を繰り返しながら進むのが特徴である。(a)から(f)に進むにつれ肩峰に近づくが、精度の高い溶接作業では肩に近づくにつれ、その軌道の特徴は失われていく。手首から体に近い箇所では進行方向への運動が大半を占める。Fig.2.13 から Fig.2.15 に作業道具とそれを操作する腕の各部の作業中の移動距離を示す。縦軸に移動距離[mm]を横軸に各部位を、青が X 方向、赤が Y 方向、黄色が Z 方向の値を示す。溶接作業では道具の動きが大きい、2つの溶接作業では進行方向と運動軌道に違いがあるため、値の大きな方向は異なるものの、中指節点、肘、肩の動きは小さい。研磨作業では道具先端の動きが激しいことがわかるが、肘の移動距離を示す値は小さく、肘より先で作業を行うことがわかる。

Table.2.3 被験者情報

| | |
|--------------------|----------|
| Age | 25 |
| Sex | Male |
| Height | 165cm |
| Weight | 60kg |
| Working Experience | 4years |
| Dominant Arm | Left Arm |

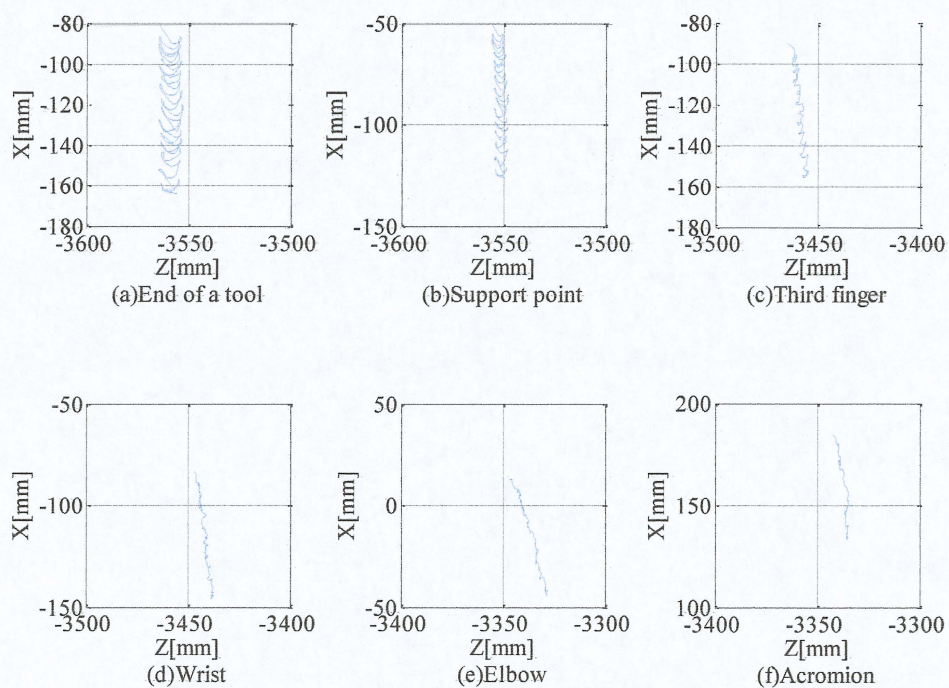


Fig.2.10 前進溶接の動作軌跡

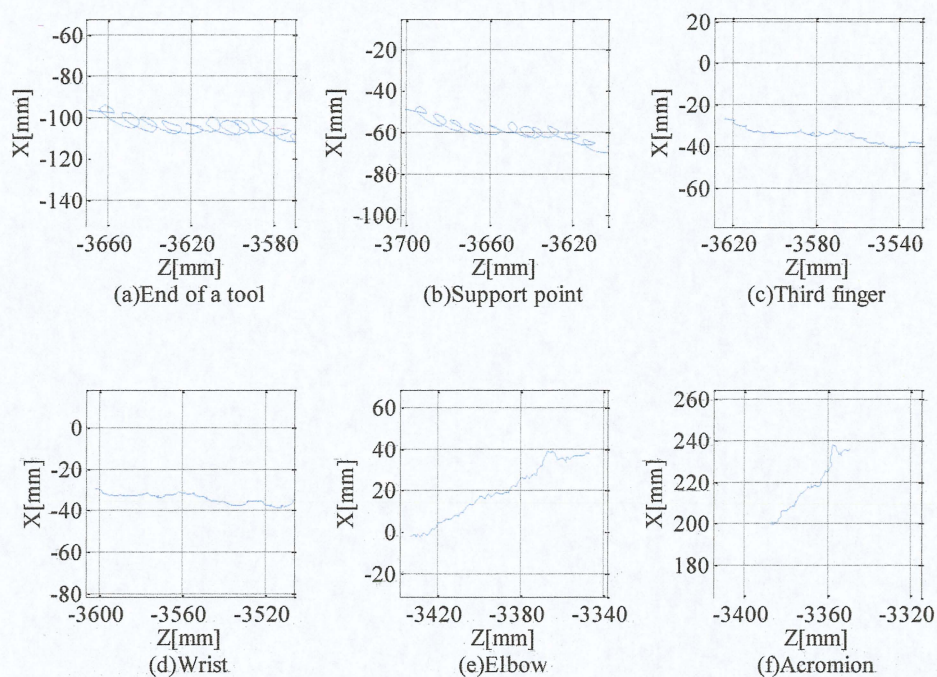


Fig.2.11 左進溶接の動作軌跡

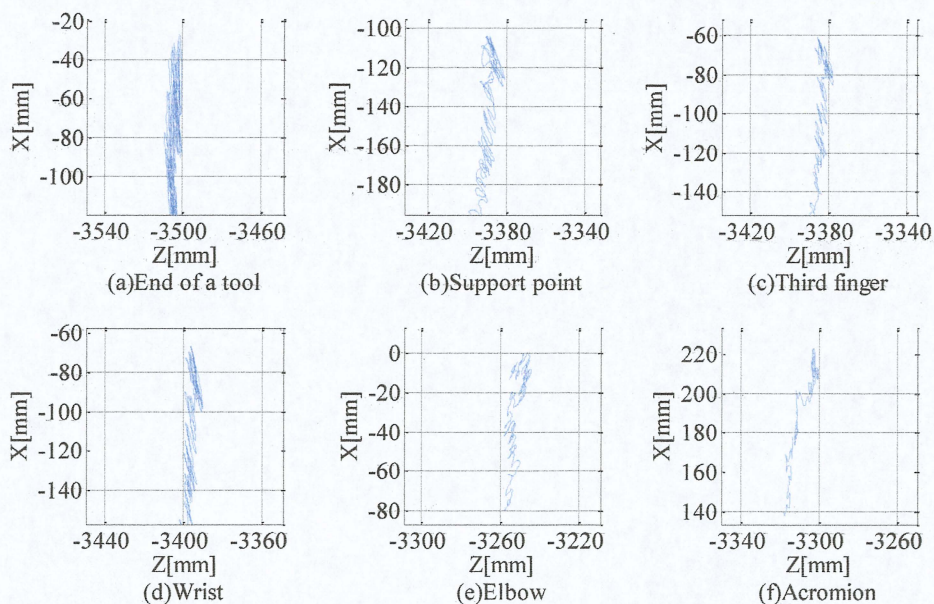


Fig.2.12 研磨の動作軌跡

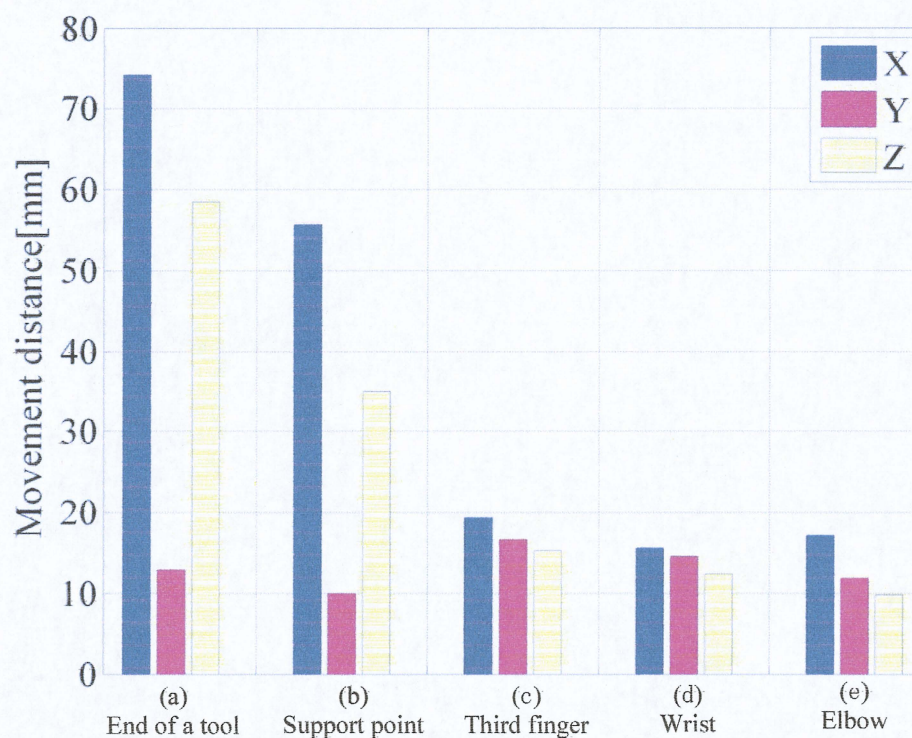


Fig.2.13 前進溶接に伴う各部の移動距離

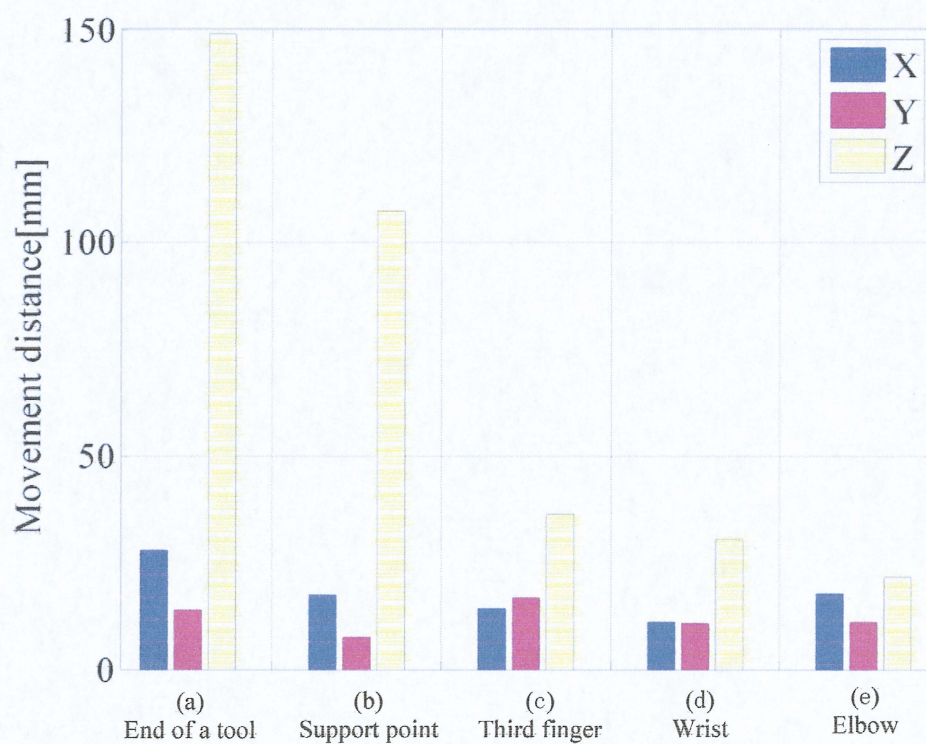


Fig.2.14 左進溶接に伴う各部の移動距離

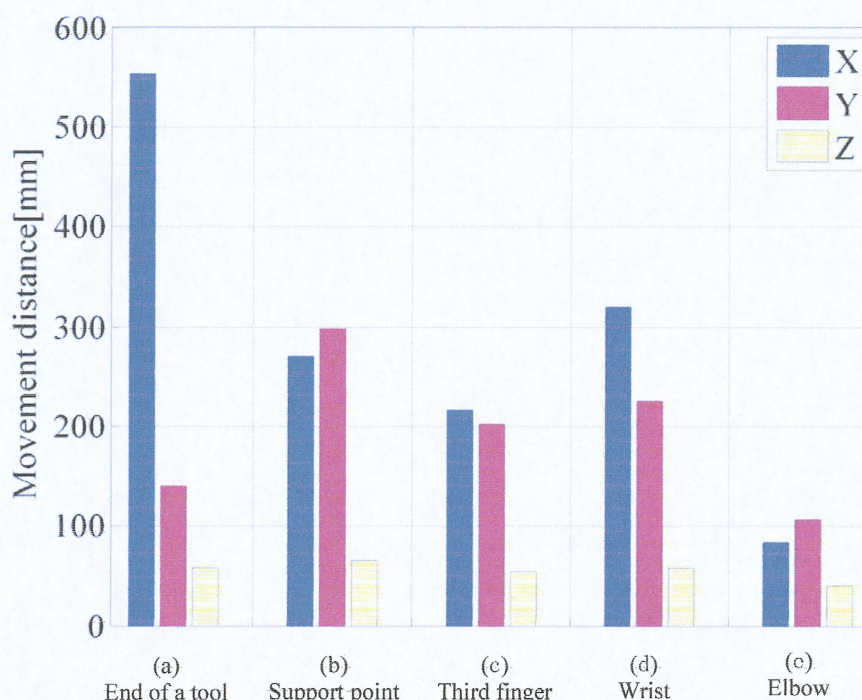


Fig.2.15 研磨に伴う各部の移動距離

2.3.2 関節角度の導出

各関節の動作範囲を明確にし、支援装置の可動域の決定と、次項で述べる負担評価のために被験者の関節角度を求めた。各関節の角度は Fig.2.16 のように定義する。膝と足首がなす直線が水平線となす角度を足曲角 θ_1 とし、股関節から膝と膝から足首を結ぶ直線のなす角度を膝屈曲角 θ_2 とし、肩から股関節と股関節から膝を結ぶ直線のなす角度を腰屈曲角 θ_3 とし、肩から股関節を結ぶ直線が鉛直方向となす角度を体幹傾斜角 θ_4 とし、体幹傾斜角に対して頸が後傾している角度を頸後傾斜角 θ_5 とし、肘から肩と肩から腰を結ぶ直線のなす角度を肩屈曲角 θ_6 とし、肩から肘と肘から手首を結ぶ直線のなす角度を肘屈曲角 θ_7 とし、肘から手首と手首から中指節点を結ぶ直線のなす角度を手首屈曲角 θ_8 とした。各部に配置して計測したマーカの情報を $P_i(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, 8)$ とし、各関節角度の導出には式(2.1)から式(2.9)を用いた。

$$P_i = (x_i, y_i) \quad (i=1,2,\dots,8) \quad (2.1)$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2}\right) \quad (2.2)$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \arctan\left(\frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}\right) \quad (2.3)$$

$$\theta_3 = 180 + \theta_2 - \arctan\left(\frac{y_4 - y_2}{x_4 - x_3}\right) \quad (2.4)$$

$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{x_4 - x_3}{y_4 - y_3}\right) \quad (2.5)$$

$$\theta_5 = \arctan\left(\frac{x_5 - x_4}{y_5 - y_4}\right) + \theta_4 \quad (2.6)$$

$$\theta_6 = \arctan\left(\frac{x_4 - x_6}{y_4 - y_6}\right) \quad (2.7)$$

$$\theta_7 = \theta_6 + \arctan\left(\frac{x_6 - x_7}{y_7 - y_6}\right) \quad (2.8)$$

$$\theta_8 = 180 - \theta_7 - \theta_6 + \arctan\left(\frac{x_7 - x_8}{y_8 - y_7}\right) \quad (2.9)$$

Fig.2.17 に前進溶接の作業時の関節角度変位を示す。Fig.2.18 に左進溶接の作業時の関節角度変位を示す。Fig.2.19 に研磨作業時の関節角度変位について示す。各グラフは縦軸が各関節の角度変位[deg]を、横軸が時間[sec]を表している。縦軸の表示範囲はいずれも 40[deg]とした。黒の実線が一回目の計測動作、青の点線が二回目の計測動作、赤の破線が三回目の計測動作を示している。角度変位は少ないため、値は緩やかな変化しか見せないが θ_7 の示す上腕と前腕のなす角度の変化は比較的大きい。これは作業を行う際、肘の屈曲、伸展運動が行われていると考えられる。特に Fig.2.19 においては研磨では屈曲、伸展が頻繁に行われていることがわかる。

2.3.3 BlessPro による負担評価

作業に伴う肉体的負担の評価方法には Fig.2.20 に示す瀬尾らが開発した作業負担評価ソフト *BlessPro* ver2.52¹⁴⁾を用いた。評価のために必要な値として、被験者の性別、年齢、身長、体重、背筋力および作業時の姿勢を表すために保持する道具の重量、道

具までの水平距離、道具までの高さ、2.3.2 項で求めた足曲角 θ_1 、膝屈曲角 θ_2 、腰屈曲角 θ_3 、体幹傾斜角 θ_4 、頸後傾斜角 θ_5 、が必要である。ただし、体幹傾斜角と頸後傾斜角は負の値として入力する。また、背筋力の計測は腰部を痛める危険があるため、体力・運動能力調査書¹⁵⁾から勤労青年の平均値である 146.7kg を用い、保持する道具の重量は 2.0kg とした。各値を入力し、負担の評価として各関節周りに働くモーメントを求めた。両足が揃った状態の値が必要なため、角度の導出に用いる計測データは各作業の作業開始時のものとした。各作業の 3 回の計測の平均値と標準偏差を示したものを Fig.2.21 に示す。グラフは縦軸を各関節周りに働くモーメント[Nm]、横軸に(a)頸、(b)肘関節、(c)肩関節、(d)下位腰椎の L5/S1、(e)股関節、(f)膝関節、(g)足関節という身体部位を示す。グラフ中で、黄色が前進溶接、赤が左進溶接、緑が研磨、青は道具保持無しで腕を下ろした状態の値を入力した。全体の値から腰部への負担を示す L5/S1、股関節、足関節周りの値が高いが、日常生活においても腕や頸に比べ、支えるべき重量が大きいため、備わっている筋力は高いと考えられる。被験者自身の体重だけを腕を下ろした状態で支えている青の姿勢の値も高いことからモーメントの値が高いことは問題ではないと考えられる。青の姿勢と他の値を比較すると、値が高いのは頸、肘関節、肩関節の部位だということがわかる。特に値の差が大きいのは肩関節周りである。頸、肘関節、肩関節に注目し、保持する道具重量がなくなった場合の各関節周りに働くモーメントの変化を求めたものを Fig.2.22 に示す。軸の表す意味は Fig.2.21 と同様である。ただし、黄色、赤、緑の値は 2 つずつ示し、黒丸の付いた値は道具重量 0kg とし道具保持無しの値、黒丸のないものは道具重量 2kg の時の値である。また、このときの道具保持時に対する保持無しの各関節周りのモーメントの値の軽減率を Table.2.4 に示す。道具重量による負荷をなくすことで頸への影響はないが、肘関節で 62.7%、肩関節で 44.9%の値の減少が見込めることがわかった。

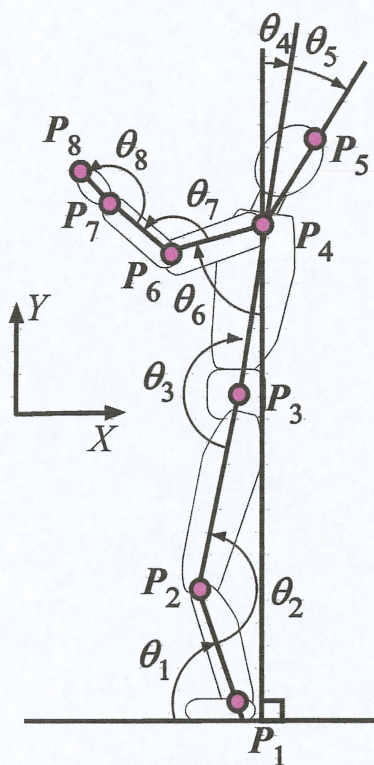


Fig.2.16 関節角度の定義

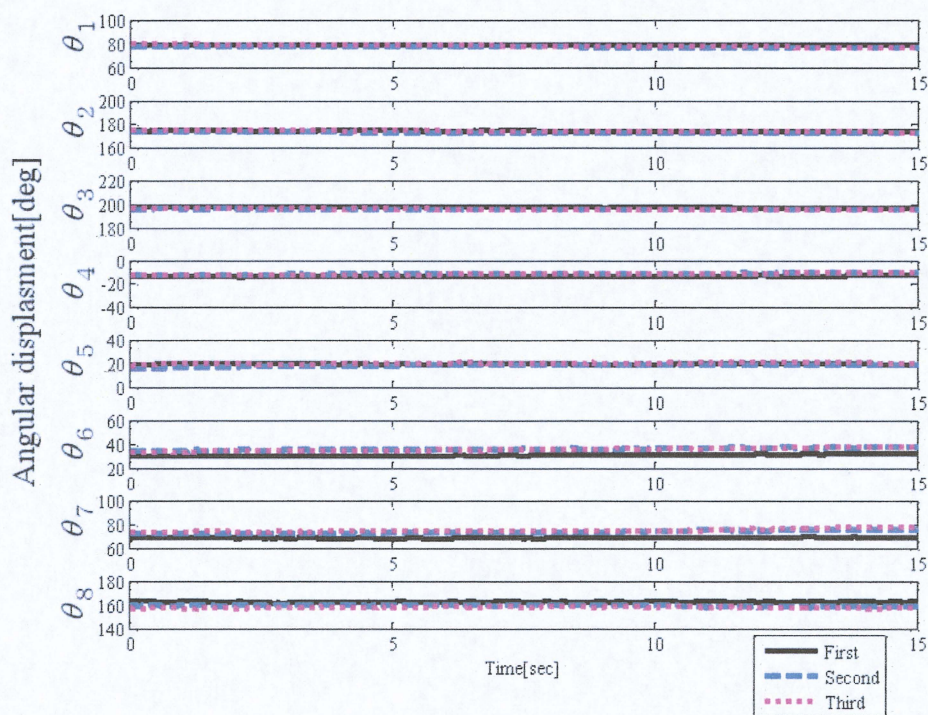


Fig.2.17 前進溶接の関節角度変位

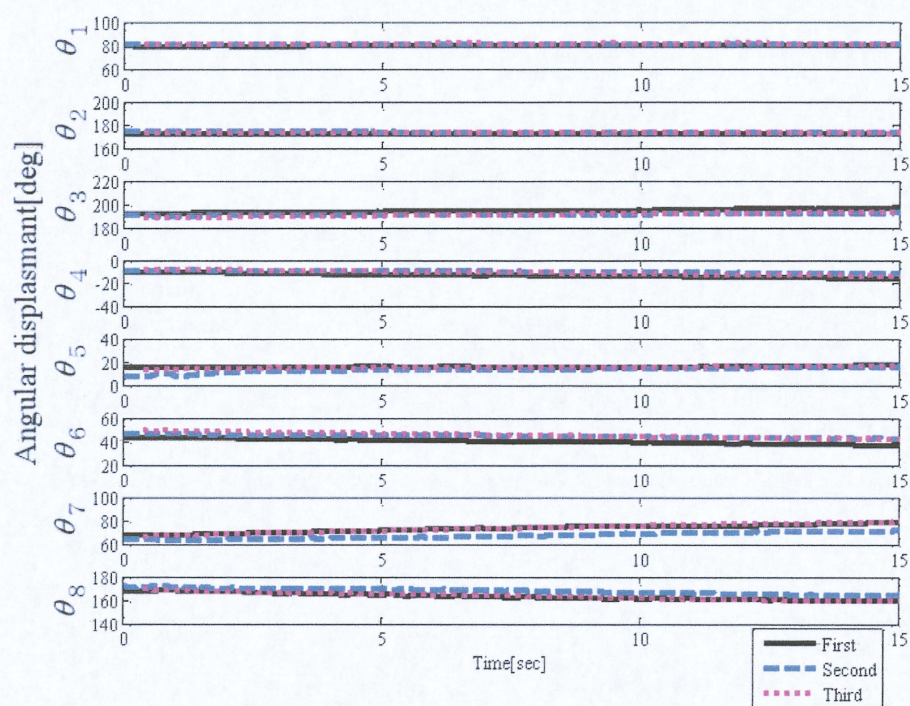


Fig.2.18 左進溶接の角度変位

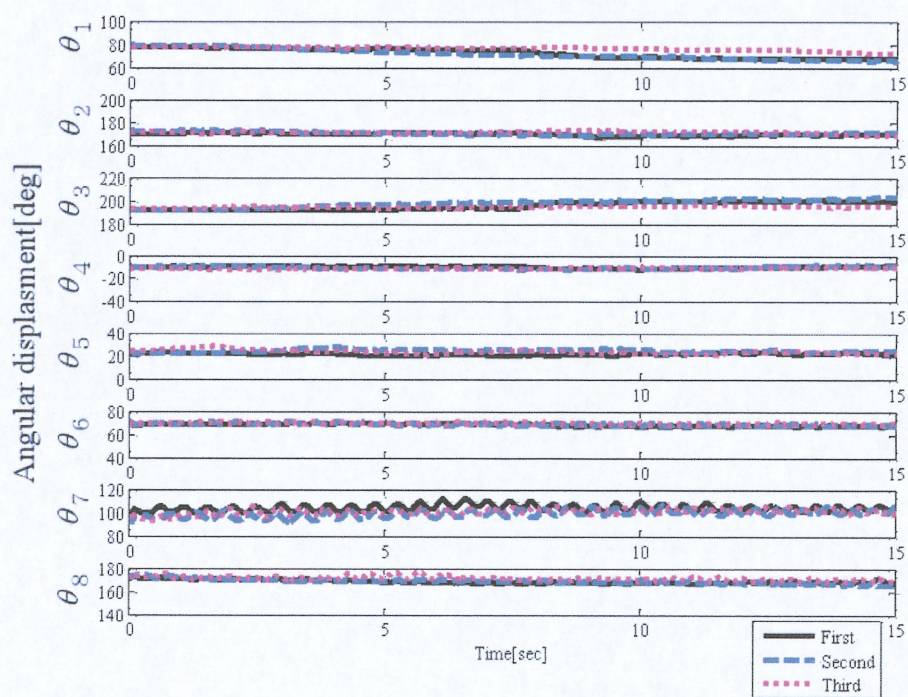


Fig.2.19 研磨の角度変位

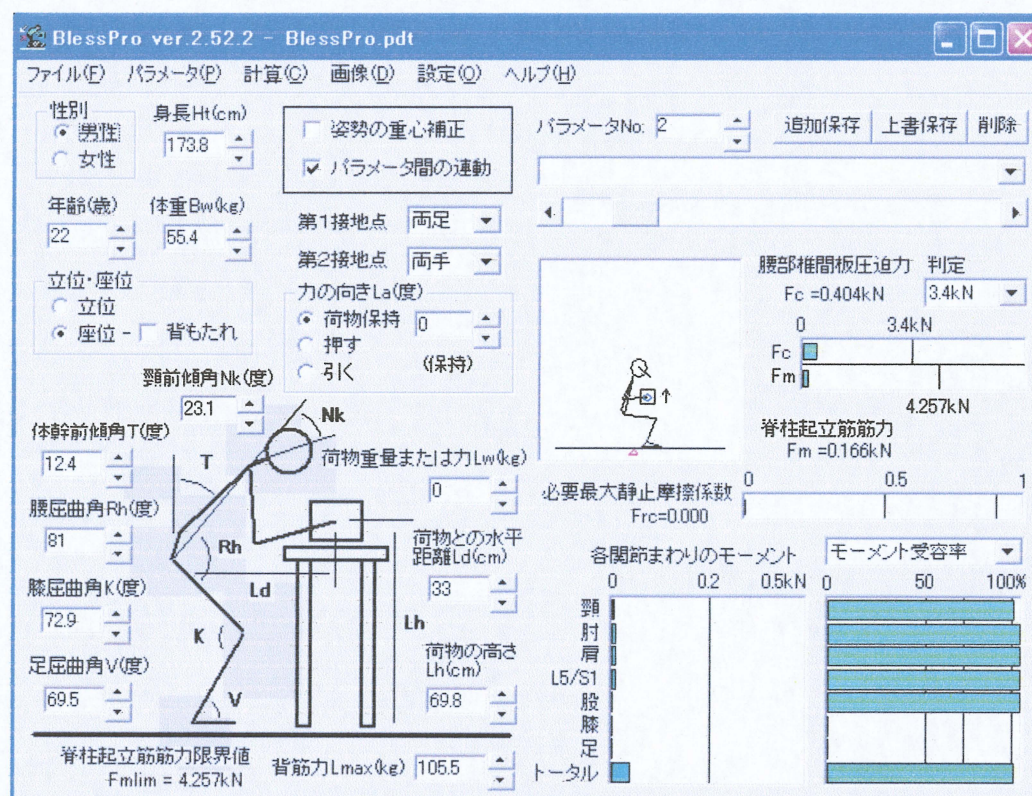


Fig.2.20 BlessPro ver2.52

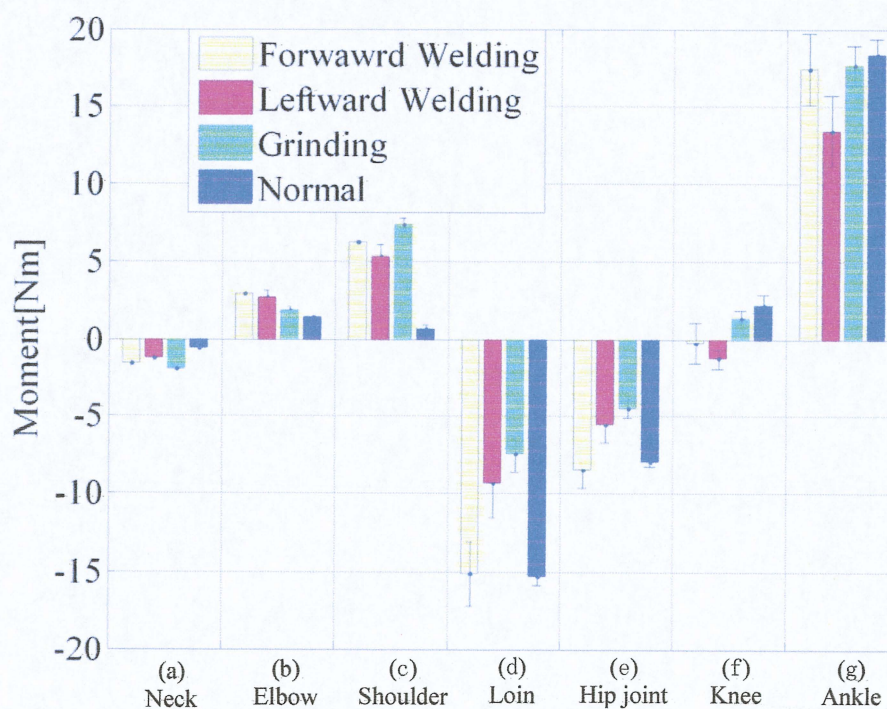


Fig.2.21 各関節周りに働くモーメント

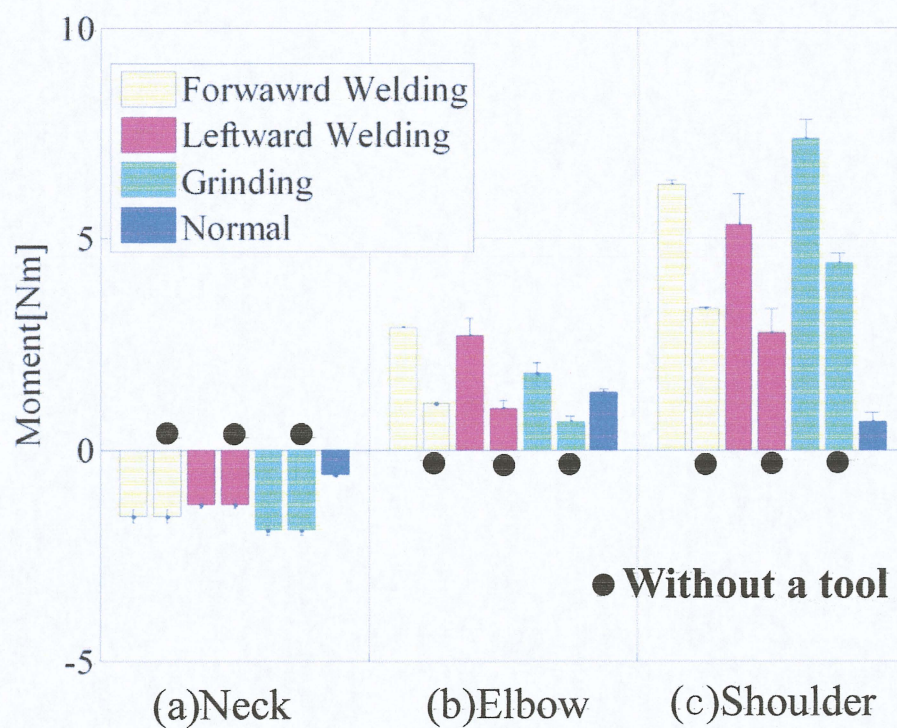


Fig.2.22 道具重量による各関節周りに働くモーメントの変化

Table.2.4 各関節周りのモーメントの軽減率

| | Neck | Elbow | Shoulder |
|---------|-------|-------|----------|
| First | 0.000 | 0.621 | 0.468 |
| Second | 0.000 | 0.630 | 0.481 |
| Third | 0.000 | 0.630 | 0.398 |
| Average | 0.000 | 0.627 | 0.449 |

2.3.4 従来作業の肉体的負担の主観評価

溶接工の主観評価として、Fig.2.23 主観評価用図に示す人体図に負担を感じる部位を記入する方法を用いた。被験者には各作業において日ごろ作業を行う際に、負担を感じる部位について記入して頂いた。各作業の結果について Fig.2.24 に示す。すべての作業において利き腕上腕、利き腕側の肩、頸の後部が負担を感じる部位に挙げている。これは上向き作業のため、作業道具を持ち上げる動作と上を向く作業のためだと考えられる。そして、利き腕だけに負担が集中しているのは作業道具の保持はほとんど利き腕だけで行い、反対側の腕は添える程度にしか使っていないという意見を頂いた。また、研磨においては腕の運動が大きいことから上腕の裏側の筋肉を使うことが考えられるため、負担を感じる部位に挙げられたと考えられる。この結果は、前述した負担評価で頸、肘関節、肩関節の負担が大きいことと一致した。

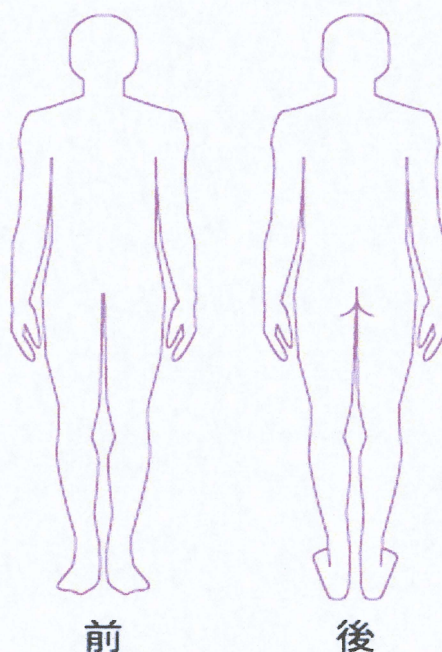


Fig.2.23 主観評価用図

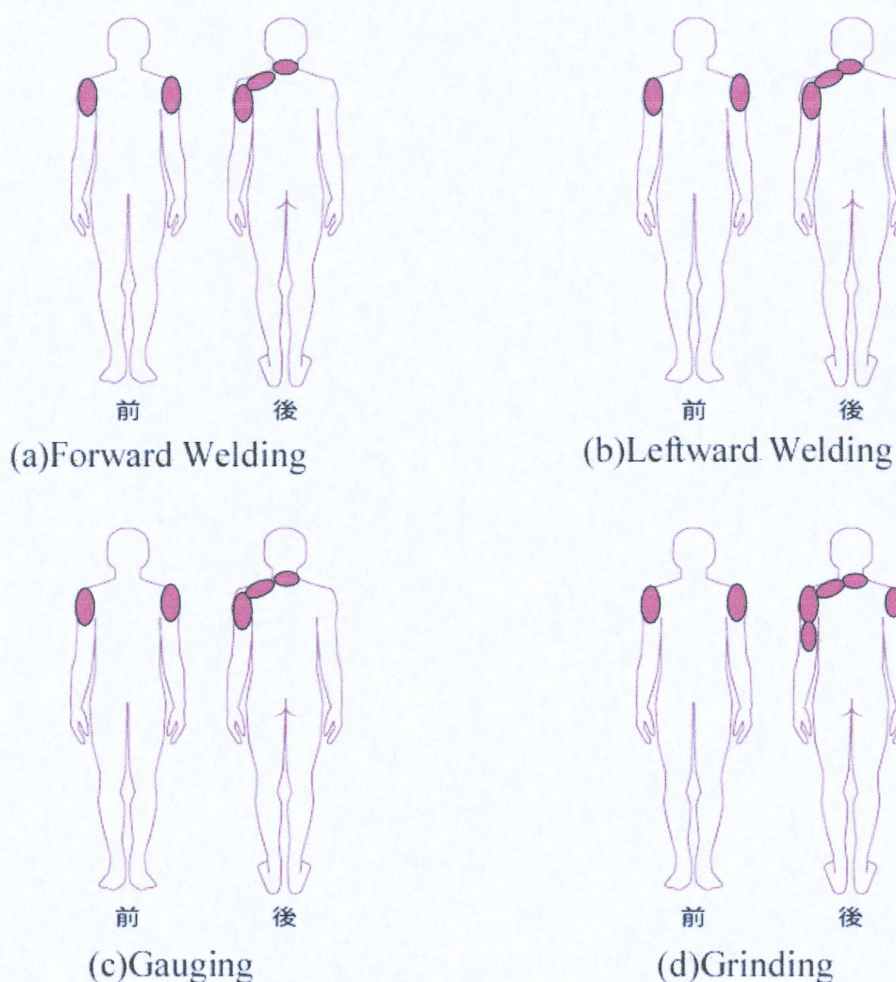


Fig.2.24 負担を感じる部位

2.3.5 肩関節周りのトルクの再評価

2.3.3 項では, *BlessPro* によって肩関節周りのトルクが特に高いことがわかった. しかし, *BlessPro* では保持重量は均等に両手に分散され評価されるが, 対象作業では, 作業道具は, 主に利き腕で扱うため, その重量負担は両腕に均等ではない. そこで肩関節周りのトルクについて再評価を行い, 溶接支援装置の製作のための参考情報とする. ここでは, Fig.2.25 肩関節周りに働くモーメントに示すように肩を座標原点にとり上腕と前腕, 手, 保持する作業道具を剛体と捉えて各部位から合成重心と, 肩から, 合成重心の距離を求め肩関節周りに働くモーメントを求める¹⁶⁾⁻¹⁸⁾. $m_1[\text{kg}]$ は上腕重量, $m_2[\text{kg}]$ は前腕重量, $m_3[\text{kg}]$ は手と保持物体の重量, 手と保持物体の重心位置は

同じと考える． G は合成重心位置である．作業動作の計測から上腕と前腕，手の長さはわかるため，各部の一端から重心位置までの距離の割合から各部の重心位置を求める¹⁹⁾．合成重心の位置(X_0, Y_0)は式(2.10)と(2.11)，肩から合成重心までの距離 L [m]は式(2.12)，合成重心が X 軸となす角度を θ [deg]とし式(2.13)で， M を全体の質量[kg]， g を重力加速度[m/s²]，そして肩周りに働くモーメント T [Nm]は式(2.14)で求められる．この式を用いて，前進溶接，左進溶接，研磨の各作業の1回目の計測値から算出した値を Fig.2.26 に示す．溶接に比べ，道具が重いため研磨作業の値が高くなっている．動きも比較的激しいため，振動するように値が波打つことがわかる．Table.2.5 には各作業の肩周りに働くモーメントの範囲を示した．最小値 13.1Nm，最大値が 18.8Nm となった．例えば，肩周りのモーメントを支える装置であれば，最大値を超えると作業者の支援装置からの力が負担となりかねないので，支援する力は，最大値より小さい範囲で設定を行う．

$$X_0 = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (2.10)$$

$$Y_0 = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (2.11)$$

$$L = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2} \quad (2.12)$$

$$\theta = \arctan \frac{Y_0}{X_0} \quad (2.13)$$

$$T = MgL \sin \theta \quad (2.14)$$

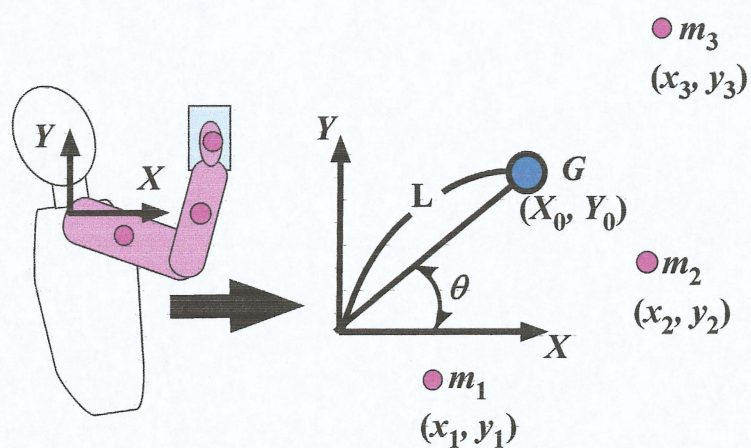


Fig.2.25 肩関節周りに働くモーメントの導出

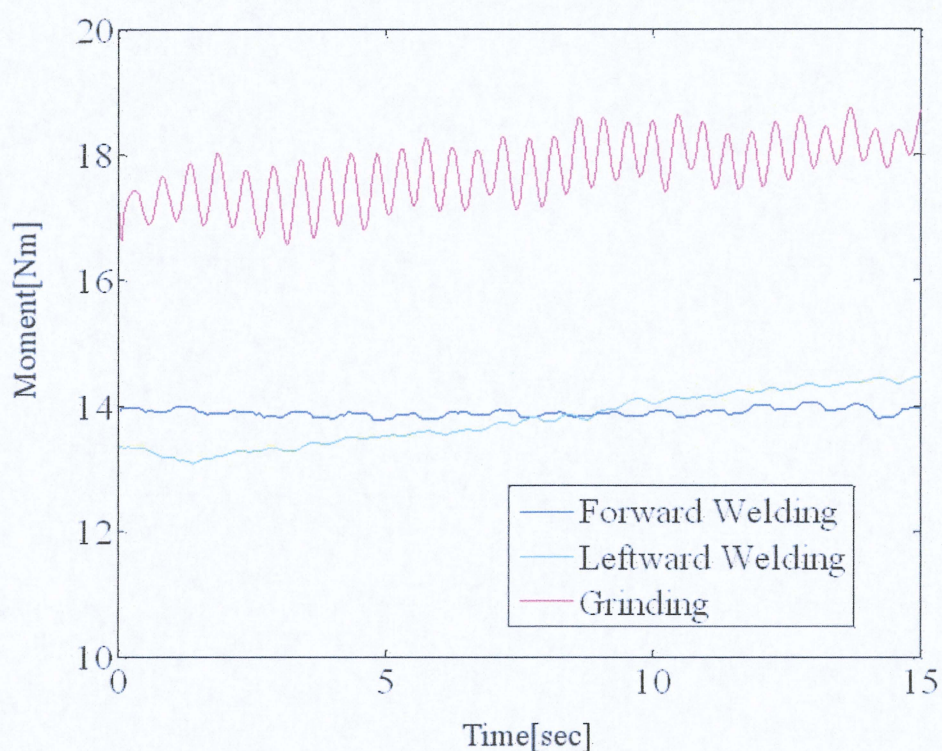


Fig.2.26 各作業における肩関節周りのモーメント

Table.2.5 各作業における肩関節周りのモーメントの範囲

| Task | Maximum Value[Nm] | Minimum Value[Nm] |
|------------------|-------------------|-------------------|
| Forward Welding | 14.1 | 13.8 |
| Leftward Welding | 14.5 | 13.1 |
| Grinding | 18.8 | 16.7 |

第3章

上向き溶接支援装置の設計と製作

本章では、上向き溶接作業支援装置の設計と製作について、2章で述べた各作業動作の解析結果と対応させて、それぞれの実装を述べる。

3.1 設計の構想

2章より、上向き溶接動作における主観的評価と客観的評価から肩・肘・首への負担が大きいことが明らかとなった。本研究では、その中でも特に負担の大きかった肩への負担を軽減する支援装置を設計する。

3.2.1 支援装置に要求される条件

2章では上向き溶接作業における姿勢の変化が少なく、特に肩の動作範囲が小さいことから、支援装置を設計する上で、装置の肩周りの可動域は小さくてもよい。また、造船現場では、一日中同じ場所で作業をするということはまずありえない。通常はガウジングという作業で溝を彫り、溶接作業で彫った箇所を溶接を行い、グラインダという研磨作業で溶接面を整えていく。不良箇所がなくなるまで、この3つの作業サイクルを繰り返し行い、不良箇所がなくなると、他の現場に移動してはガウジング・溶接・グラインダという流れで繰り返し行っていく。このため、1日で作業を行う現場は何ヵ所にもなり、移動回数も多くなるので、支援装置の大きさとしては小型で軽量の装置が要求される。また、溶接作業者が行う溶接はアーク溶接であり、これは電気の放電現象を利用し、それによって発生する高熱で母材および溶接棒を溶融させて一体化するという溶接法である。アーク溶接により発生する電流により、作業者が感電

してしまう危険性があるため、通常アーク溶接作業を行う際は、溶接作業者の身体における金属の露出は安全上の観点から問題である。よって、本研究では支援装置になるべく金属を使用しない方向で材料の選定を進めていく。また、ガウジング・溶接・グラインダの3つの作業では使用する工具はすべて異なる。このため、各作業の間には工具の持ち替えが行われる。作業中は床に置いてある工具を持ち替えるため、持ち替え作業に支障が出ないように支援装置は身体への取り付け、取り外しが簡単かつ一人でできるものがよい。さらに、本研究で設計・製作した試作装置を仮に大量生産すると考慮すると、一機当たりのコストが低いものが求められる。これらの点を考慮した上で、支援装置の性能、支援方法を決定していく。

3.2.2 支援装置の形状

現在のパワーアシストシステムは様々な形状、装着方法のものが研究・開発されている。3章2.1節で述べたように、支援装置に要求される条件は様々なものがあり、そのすべてを満たした上で肩の負担を軽減できる装置の形状を提案する。Fig.3.1の(a)に示すものは、電磁石を利用して作業を支援する装置である。Fig.3.2の(a)のように、電磁石の磁力で甲板に支援装置本体を吸着させ、上向き溶接作業者の腕を吊り上げるという支援方法である。この支援方法は、甲板に吸着させる電磁石の強さを強くしてやることで、工具の重量だけでなく腕の自重も支えられるというメリットがある。しかし、吸着面が水平でなければならず、支援装置自体が作業者のほぼ真上に位置しているため、支える負荷が電磁石の吸引力を超えてしまった時、または停電時に電磁石の磁力が失われてしまった時などに、装置が甲板から剥がれ落ち作業者が負傷する危険があり安全性に欠けるというデメリットもある。また、Fig.3.1の(b)に示すものは、Fig.3.2の(b)のように上向き溶接作業者の肩に装着する外骨格型のパワーアシストシステムである。このような外骨格型パワーアシストシステムは、人間の運動を補助する上で望ましい形態を持っていると考えられ、他の研究でも数多く取り入れられてい

る。しかし、本研究では、上向き溶接作業における肩周りのモーメントが大きく、それを支えるためには大きなアシスト力を必要とするため、支援装置本体が大きくなってしまう。また、Fig.3.1 の(c)に示すものは、Fig.3.2 の(c)のように上向き溶接作業者の腰に装着して肘部を支える身体装着型のパワーアシストシステムである。この支援形式では、Fig.3.2 の(b)に比べ、上向き溶接作業における肩周りのモーメントに対するアシスト力が小さくてすみ、結果として装置の小型化が図れる。従って、本研究で提案する溶接支援装置の型式は身体装着型とし、さらに、比較的重量のあるアクチュエータなどは使用せず、機械的要素であるばねから動力を得ることで、より軽量で小さな支援装置の設計を目指す。

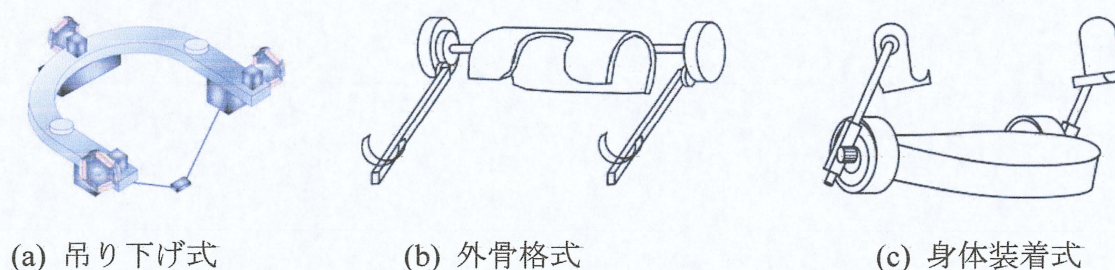


Fig.3.1 支援装置構想

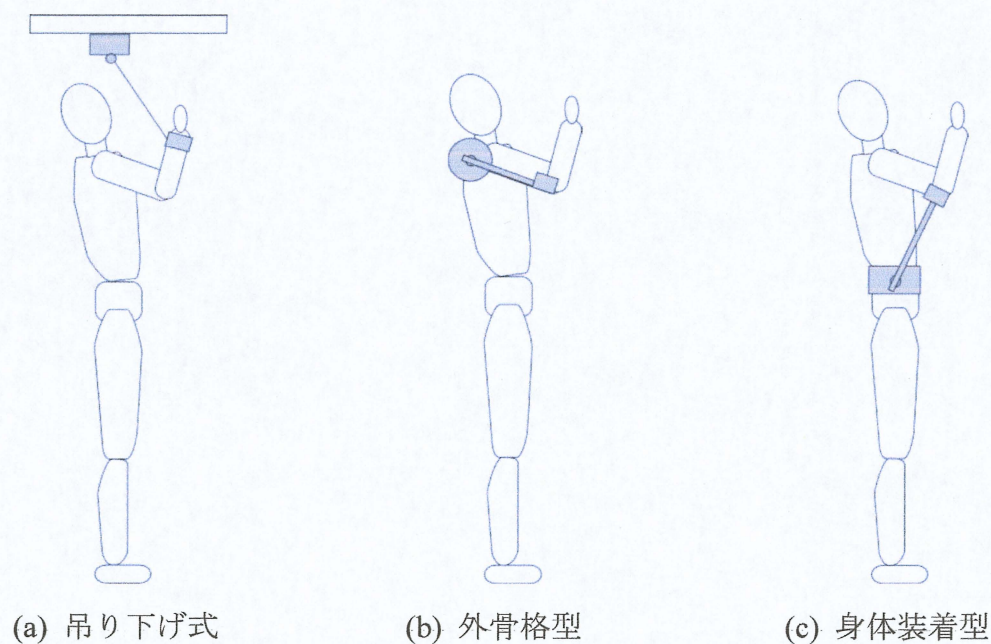


Fig.3.2 支援装置装着例

3.3.1 機構設計

上向き溶接支援装置の機構部を Fig.3.3 に示す。まず、要求仕様の 1 つである上向き溶接作業を支援するために必要な装置による押上げ力は、ゼンマイばねから得ることとする。よって、そのゼンマイばねの力を伝達するために、軸からピニオン、ラックを機構に採用する。ラックとピニオンを噛み合わせ動かすためにばねケースとラックの間にスライドレールを採用する。

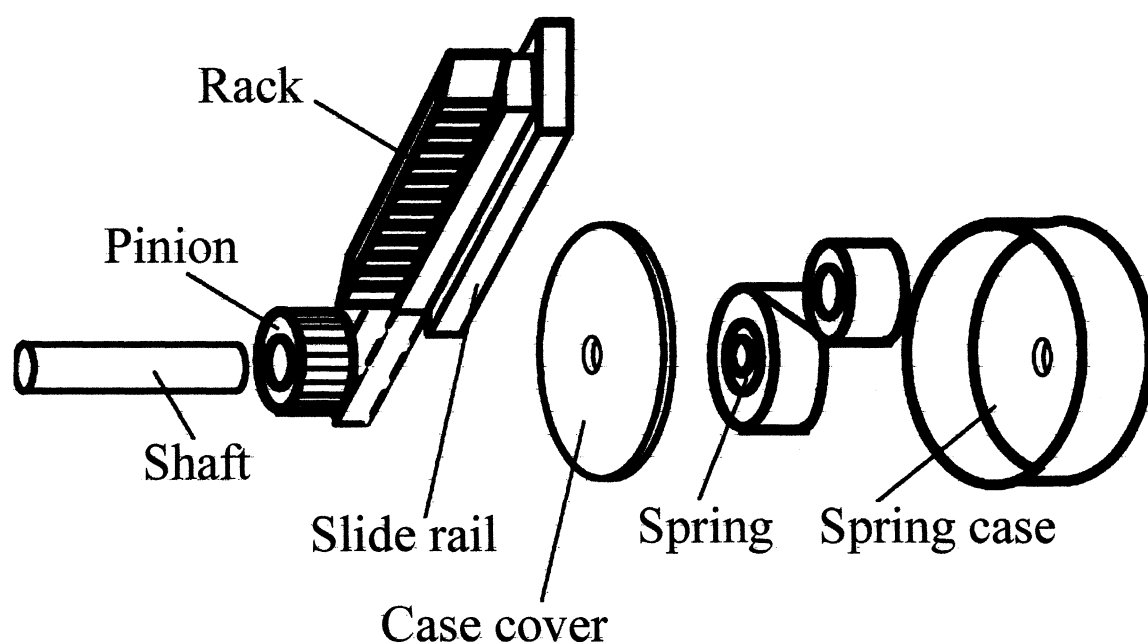


Fig.3.3 上向き溶接支援装置の機構部

3.3.2 ゼンマイばねの選定

実際の上向き溶接作業を行う際に肩周りに働くモーメントは、2章より最大で18.8Nmである。ここで、Fig.3.4に示すように、 $T[\text{Nm}]$ は肩周りのモーメント、 $F[\text{N}]$ はこの時に必要となる支援装置による肘の押上げ力、 $L[\text{m}]$ は前腕の長さを示している。よって、要求される押上げ力は式3.2により計算される¹⁷⁾。

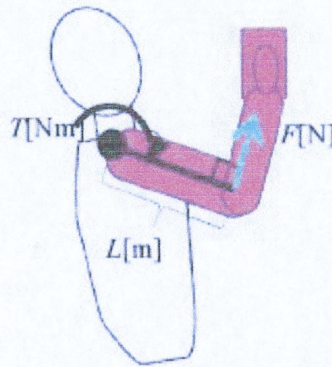


Fig.3.4 必要な押上げ力とその方向

$$T[\text{Nm}] = F[\text{N}] \cdot L[\text{m}] \quad (3.1)$$

$$F[\text{N}] = T[\text{Nm}] / L[\text{m}] \quad (3.2)$$

まず、18.8Nmというモーメントの値は、上腕の重量、前腕の重量、手の重量、作業工具の重量を考慮したものであり、肩周りのモーメントが最大となる時のものである。この時の位置のデータから、肩から肘までの長さを考慮して $L=0.3\text{m}$ とおく。これらの値を式3.2に代入すると、必要な腕の押上げ力 $F[\text{Nm}]$ は62.7Nmと計算される。この肘を押し上げる出力を持つ小型のゼンマイばねとして、Fig.3.5に示すサミニ工業社製ゼンマイ9101を採用する。採用したゼンマイばねの仕様はTable.3.1に示す。また、ゼンマイばねの有効回転数と出力の関係をFig.3.6に、ゼンマイばねの巻き芯にピニオンを付けラックに力を伝達すると考えた場合のゼンマイばねの回転数（巻き数）とラックへの出力の関係をFig.3.7に示す。グラフの縦軸にラックに伝達する力

を、横軸にゼンマイばねの回転数を示している。グラフ中の青い実線はピニオンのピッチ円直径が 22mm のとき、赤い実線は 30mm のとき、緑の実線は 40mm のときの値を示す。さらに、出力 50N に必要な回転数を Table.3.2 に、人が力を加えた時の挙動として、5N の力でラックを押した場合のラックの移動距離を Table.3.3 に示す。



Fig.3.5 採用したゼンマイばね

Table.3.1 採用したゼンマイばねの仕様

| Material | SK-5 |
|-------------------------|------------|
| Plate width × thickness | 1.0mm×9mm |
| Outer diameter | 53mm |
| Inner diameter | 17mm |
| Developed length | 1330mm |
| Spring constant | 725Nmm/rev |

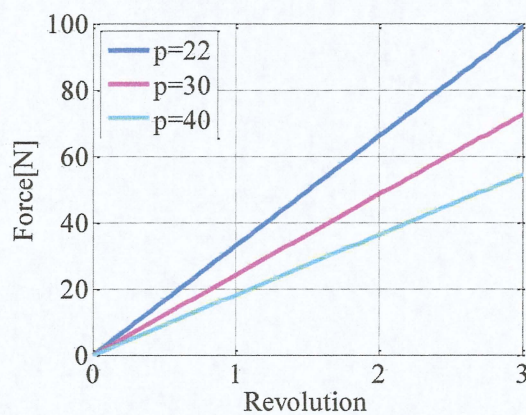


Fig.3.6 ばねの有効回転数と出力の関係

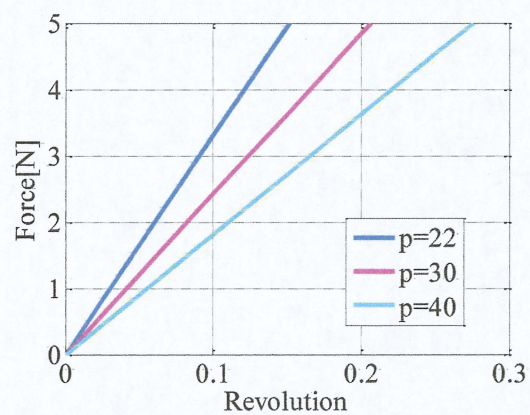


Fig.3.7 回転数と出力の関係

Table.3.2 出力 50N に必要な回転数

| Pitch diameter | 22mm | 30mm | 40mm |
|----------------|------|------|------|
| Revolution | 1.5 | 2 | 2.7 |

Table.3.3 出力 5N でのピニオンによるラックの移動距離

| Pitch diameter | 22mm | 30mm | 40mm |
|----------------|--------|--------|--------|
| Displacement | 10.4mm | 18.8mm | 33.9mm |

3.3.3 ばねケース，ケースカバーの選定

装着時に表面にさらされる部位であるので，絶縁性があり，なおかつ軽量で強度の得られる材料を選定する．また，ゼンマイばねを収納するためのケースの役割があり，製作時に加工が必要となる部位なので，切削性の良いものを選定する．電気絶縁性，機械的強度があり，なおかつ軽量で切削性の良い材料となると，プラスチックや樹脂素材があげられる．その中でも Fig.3.8 や Fig.3.9 に示すような樹脂材料のベークライトは，少しコストは高いものの前述の要求仕様をすべて満たす材料であるので，本研究ではベークライトを採用する．また，造船所での溶接現場では高温となる作業環境が想定されるので，本研究ではゼンマイばねを収納するケース本体部に熱膨張率の小さい布入りベークライトを，ケース蓋には布入りベークライトに比べコストの低い紙入りベークライトを採用する．また，Table.3.4 には採用した紙入りベークライトの物性値²⁰⁾を，Table.3.5 には採用した布入りベークライトの物性値²⁰⁾を示す．さらに，Fig.3.10 には加工後のケースカバーを，Fig.3.11 には加工後のばねケースを示し，Fig.3.12 にはゼンマイばねを収納したばねケースを示す．

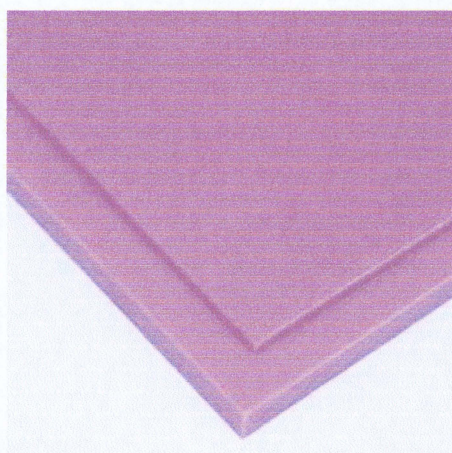


Fig.3.8 紙入りベークライト

Table.3.4 採用した紙入りベークライトの物性値

| Material | Phenolic resin |
|--|---|
| Thickness | 15mm |
| Hardness | R122(Rockwell) |
| Specific gravity | 1.4 |
| Tensile strength | 78~118MPa |
| Compressive strength | 147MPa |
| Bending strength | 157MPa |
| Continuous use temperature of heat-resistant | 130℃ |
| Coefficient of thermal expansion | 1.6×10^{-4} |
| Volume resistivity | $10^{15} \sim 10^{16} \text{W} \cdot \text{cm}$ |

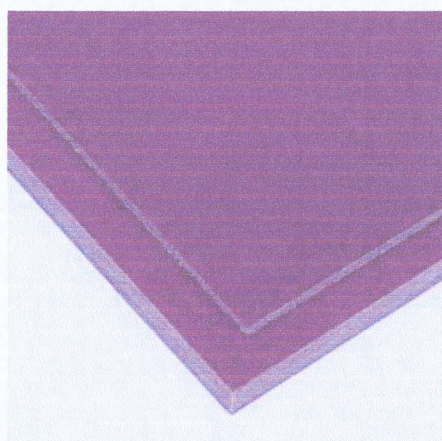


Fig.3.9 布入りベークライト

Table.3.5 採用した布入りベークライトの物性値

| Material | Phenolic resin |
|--|---|
| Thickness | 25mm |
| Hardness | R122(Rockwell) |
| Specific gravity | 1.4 |
| Tensile strength | 69~109MPa |
| Compressive strength | 147MPa |
| Bending strength | 157MPa |
| Continuous use temperature of heat-resistant | 140℃ |
| Coefficient of thermal expansion | 0.6×10^{-4} |
| Volume resistivity | $10^{14} \sim 10^{15} \text{W} \cdot \text{cm}$ |

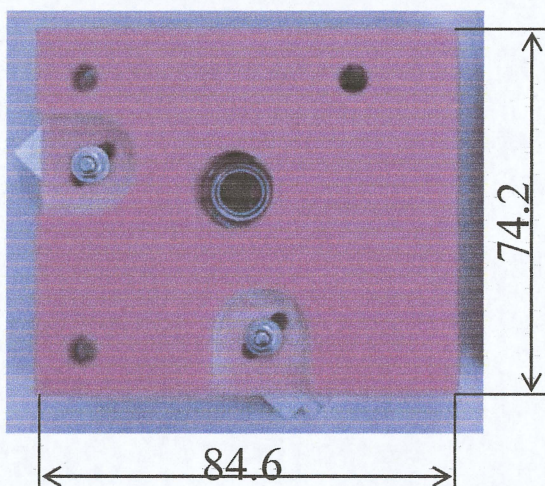


Fig.3.10 加工後のケースカバー

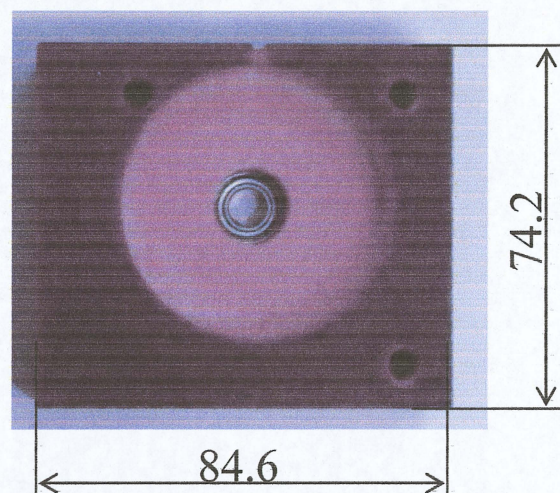


Fig.3.11 加工後のばねケース

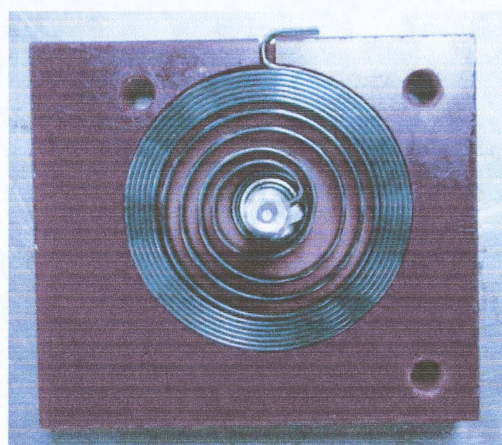


Fig.3.12 ゼンマイばね収納後のばねケース

3.3.4 ピニオン，ラックの選定

ゼンマイばねによる力を伝達するためのピニオンとラックは、支援装置表面にさらされる部位なので電気絶縁性と強度があり軽量のプラスチック製のものを選定する。ここで、要求される押上げ力は3.1節より 62.7N であり、 $F[N]$ は接線方向の力を、 $r[m]$ は歯車のピッチ円半径を表している。Fig.3.13 に示すように歯面にかかるトルク $T[Nm]$ は式 3.3 により計算される²⁾。

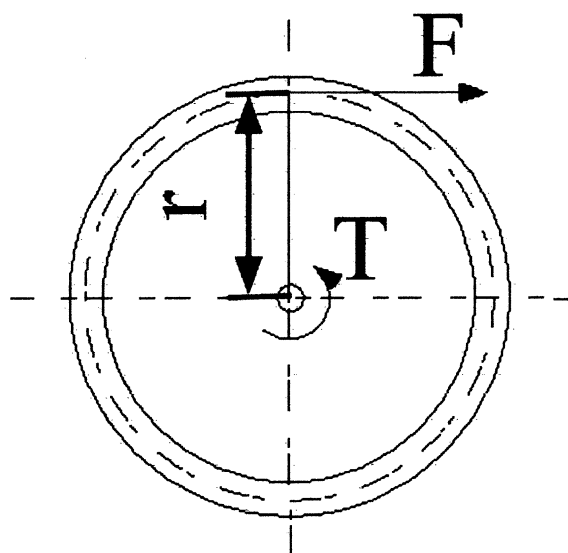


Fig.3.13 歯面にかかる力

$$T[Nm] = F[N] \cdot r[m] \quad (3.3)$$

まず、ピニオンのピッチ円直径を 22mm と仮定すると、必要な押上げ力は 62.7N であるから、式 3.3 より、トルク $T[Nm]$ は 0.69Nm と計算される。このトルクに耐える許容曲げトルクを持つピニオンとして、Fig.3.14 に示すような小原歯車工業製の PS・PSA プラスチック平歯車 PS1-22 (ピニオン) を採用する。また、ラックの選定には、必要な押上げ力 62.7N に耐える許容曲げ強さを持つものとして、Fig.3.15 に示すような小原歯車工業製の PR・PRF プラスチックラック PR1-500 を採用する。採用した平歯車の仕様を Table.3.6 に、ラックの仕様を Table.3.7 に示す。

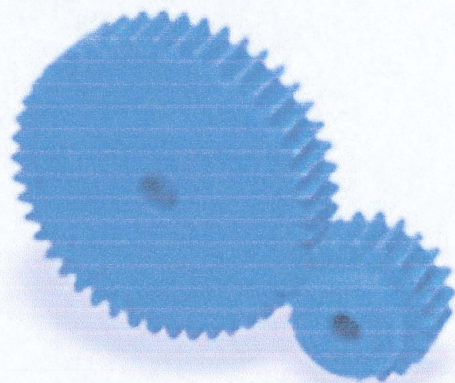


Fig.3.14 ピニオン

Table.3.6 採用したピニオンの仕様

| | |
|--------------------------|----------|
| Material | MC901 |
| Module | 1 |
| Pressure angle | 20° |
| Hole diameter | 8mm |
| Boss diameter | 18mm |
| Pitch diameter | 22mm |
| Tooth width | 10mm |
| Length | 20mm |
| Allowable bending torque | 0.69N |
| Weight | 0.0062kg |

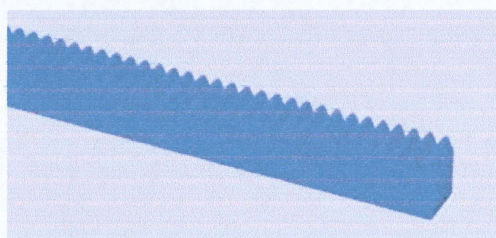


Fig.3.15 ラック

Table.3.7 採用したラックの仕様

| | |
|----------------------------|---------|
| Material | MC901 |
| Module | 1 |
| Length | 505mm |
| Tooth width | 10mm |
| Height | 12mm |
| Meshing height | 11mm |
| Allowable bending strength | 92.8N |
| Weight | 0.064kg |

Fig.3.16 にはボス長さを 8mm に切削加工したピニオンを示す. また, Fig.3.17 には, ラック正面に M6 のねじ切り加工を施したものを示す. さらに, Fig.3.18 には, 全長を 123mm に切断し, ラック側面にスライドレールの位置調整用に直径 5mm の穴を 4 つ空けたものを示す.

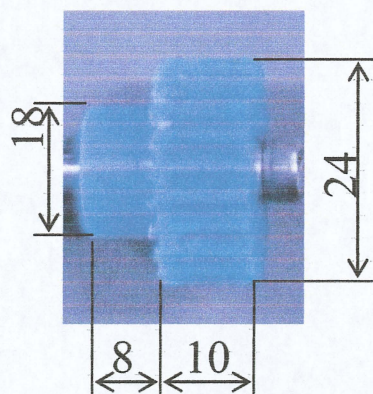


Fig.3.16 加工後のピニオン

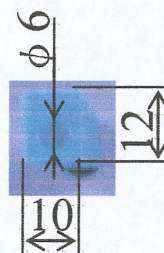


Fig.3.17 加工後のラック正面

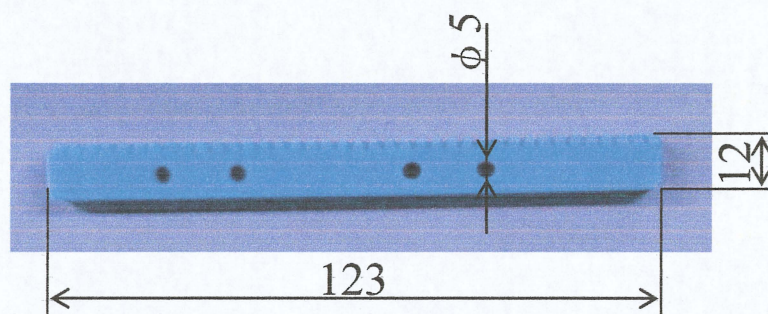


Fig.3.18 加工後のラック側面

3.3.5 スライドレールの選定

平歯車とラックの噛み合わせをスムーズな直線運動にするために、スライドレールを使用する。装置の表面にさらされる箇所であるが、この部品には大きな強度が必要となり、また今回は試作機であるので、プラスチックや樹脂素材ではなく金属の中でも比重の小さいアルミ素材の製品から選定する。ここで、Fig.3.19 に示すように $\theta[\text{deg}]$ は上腕の動作角度範囲を、 $L[\text{m}]$ は上腕の長さを示している。動作角度範囲が最大で約 $6[\text{deg}]$ となる研磨作業における上腕の動作距離範囲 $B[\text{m}]$ は式 3.4 により計算される。

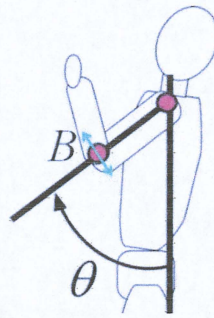


Fig.3.19 上向き研磨作業における上腕動作範囲

$$B [m] = (\theta [\text{deg}] \div 360 [\text{deg}]) \times 2\pi \times L [m] \quad (3.4)$$

肩から肘までの長さを $L=0.3\text{m}$ と仮定すると，上腕の動作範囲 $B[\text{m}]$ は，式 3.4 より 31.4mm と計算される．この動作範囲を満たすスライドレールとして，Fig.3.20 に示す THK 社製スライドレール E20+80L を採用することとする．採用したスライドレールの仕様を Table3.8 に，スライドレールの寸法詳細を Fig.3.21 に示す．

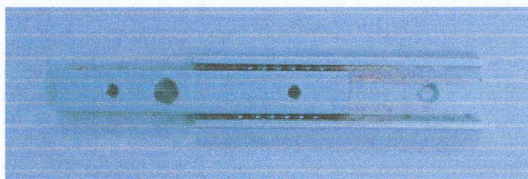


Fig.3.20 スライドレール

Table3.8 採用したスライドレールの仕様

| | | |
|--------------------------|-----------|---------|
| Rail length | | 80mm |
| Stroke | | 45mm |
| Mounting hole dimensions | A+0.3 | 50mm |
| | B+0.3 | - |
| | n(Pieces) | 2 |
| Allowable load | | 20N/set |

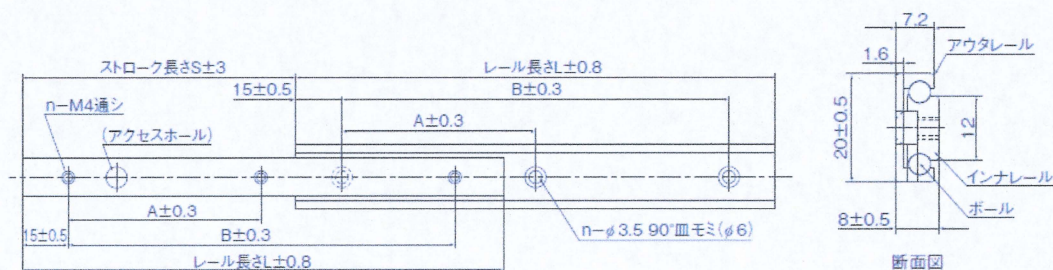


Fig.3.21 スライドレールの寸法詳細

3.3.6 軸の選定

ゼンマイばねの反力をピニオンに伝達するための軸の選定を行う。軸には、ねじれなどの力に耐えうる強度が必要とされ、装置表面に出る部分ではないので金属材料を採用する。ここで、Fig.3.22 に示すように、直径 $d[\text{mm}]$ の円柱軸にはねじれ方向のトルク $T[\text{Nm}]$ が発生するので、この時軸にかかる最大せん断応力 $\tau_0 [\text{Pa}]$ を式 3.5, 3.6, 3.7 より計算する。なお、この時の $Z_p[\text{m}^3]$ は断面係数とする。

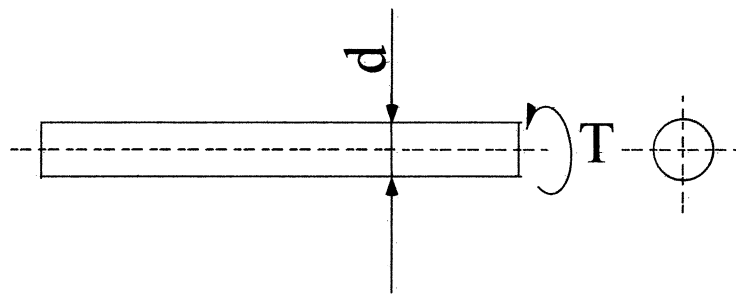


Fig.3.22 軸にかかるせん断応力

$$\tau_0[\text{Pa}] = T[\text{Nm}] / Z_p[\text{m}^3] \quad (3.5)$$

$$Z_p[\text{m}^3] = \pi d^3[\text{m}^3] / 16 \quad (3.6)$$

$$\tau_0 [\text{Pa}] = 16T / (\pi d^3) \quad (3.7)$$

式 3.7 より、円柱の直径を 8mm とすると、ゼンマイばねから伝わる力は最大で 62.7N であるから、軸に加わるせん断応力 $\tau_0[\text{Pa}]$ は 2.49MPa と計算される。よって、Table. 3.9 より許容せん断応力が 78MPa の SS400 を採用する。Fig.3.23 は採用した SS400 直径 8mm 丸棒を示す。Fig.3.24 にはゼンマイばねの巻き軸を固定できるよう、ばね板を挟んで固定できる構造としたものを示す。

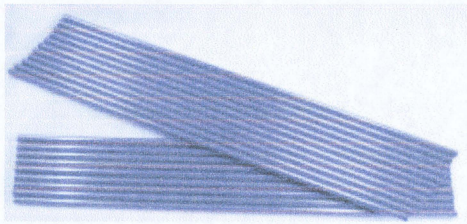


Fig.3.23 SS400 の丸棒

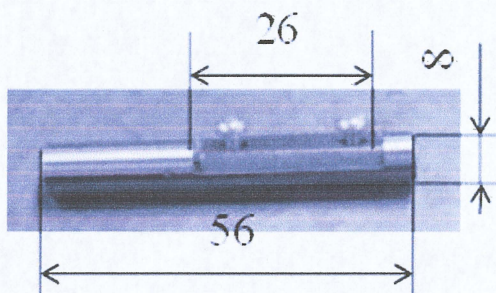


Fig.3.24 加工後の軸

Table.3.9 SS400 の物性値

| | |
|------------------------|----------------------|
| Density | 7.9g/cm ³ |
| Young's modulus | 206GPa |
| Shearing modulus | 79GPa |
| Yield strength | 240MPa |
| Tensile strength | 400MPa |
| Allowable shear stress | 78MPa |

また、軸の回転を円滑するため、ケースと軸の間に NTN 社製の玉軸受 FLW688AZ を 2 個入れる。採用した玉軸受の各寸法を Table.3.10 に、玉軸受の寸法詳細を Fig.3.25 に示す。

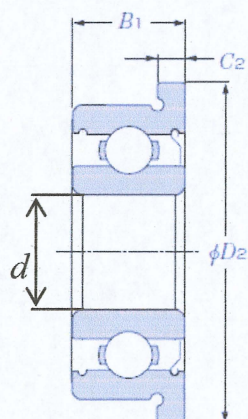


Fig.3.25 玉軸受の寸法詳細

Table.3.10 採用した玉軸受の各部寸法

| | |
|-------|-------|
| d | 8mm |
| D | 16mm |
| B_1 | 5mm |
| D_2 | 18mm |
| C_2 | 1.1mm |

3.4.1 支援装置の全体設計

支援装置の機構は、3.3 節で設計したので、次に装置本体のベルトへの取り付け部と肘を置く部分、ラックと肘置き部をつなぐアームを Fig.3.26 に示すように設計・製作する。なお本研究では、ベルトにはグレイパーのベルトを採用することとした。

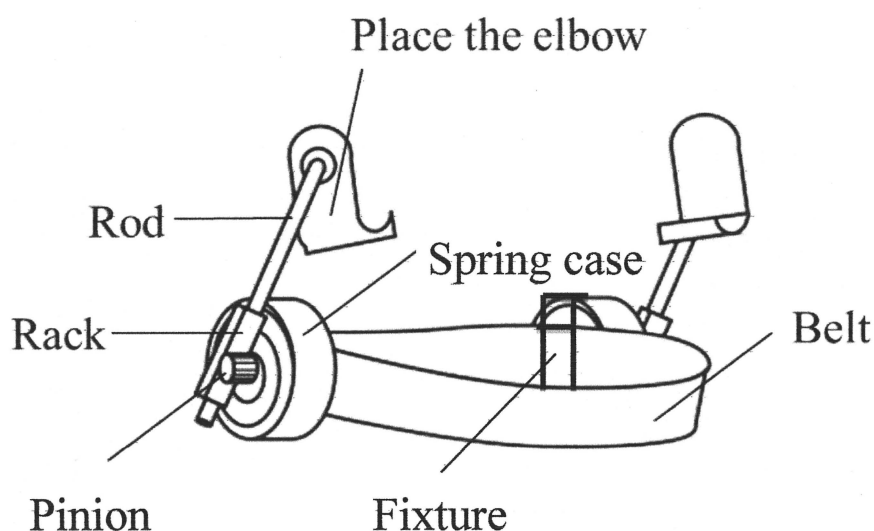


Fig.3.26 支援装置全体の構想図

3.4.2 肘置き部の設計

作業者の肘を直接支える部分であり、アーク溶接を行う溶接部位にもっとも近くなる部分でもあるので、金属材料を極力使用しない設計とする。肘置き部の骨格には、電気絶縁性と剛性のある材料として Fig.3.27 に示す板厚 3mm のアクリル板と木材を採用し、肘を置く部分には腕の安定性も考慮して Fig.3.28 に示す厚さ 1mm のウレタンゴムシートを採用する。アクリルの物性値²¹⁾を Table.3.11 に、ウレタンゴムの物性値²⁰⁾を Table.3.12 に示す。また、製作した肘置き部側面を Fig.3.29 に、製作した肘置き部上面を Fig.3.30 に示す。肘受け先端の木材の丸棒は直径 37mm である。

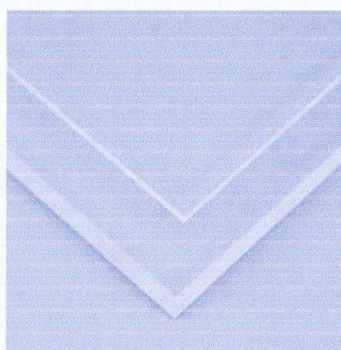


Fig.3.27 アクリル板

Table.3.11 アクリルの物性値

| | |
|----------------------|-------|
| Material | Acryl |
| Hardness | R115 |
| Specific gravity | 1.2 |
| Tensile strength | 49MPa |
| Compressive strength | 68MPa |
| Bending strength | 65MPa |

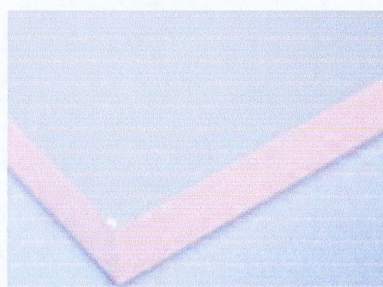


Fig.3.28 ウレタンゴムシート

Table.3.12 ウレタンゴムの物性値

| | | |
|------------------|---------------------|---------|
| Material | Polyurethane rubber | |
| Tensile strength | 27MPa | |
| Tear strength | 23N/mm | |
| Young's modulus | 100% | 0.87MPa |
| | 300% | 2MPa |

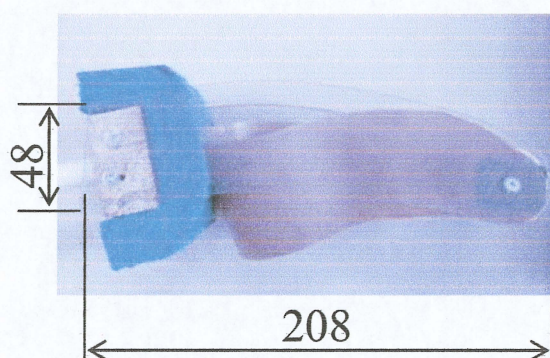


Fig.3.29 製作した肘置き部側面

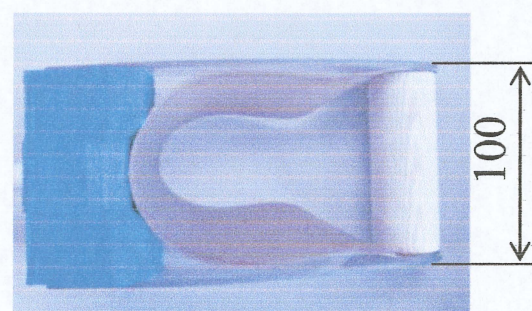


Fig.3.30 製作した肘置き部上面

3.4.3 ロッドの選定

ラックと肘置き部をつなぐ部分には、軽量で電気絶縁性を持ち、加工性の良く機械的強度の高い材料として Fig.3.31 に示すようなジュラコン丸棒で直径 14mm のものを採用する。Table.3.13 にはジュラコンの物性値¹⁸⁾を、Fig.3.32 には 300mm に切断してラックと肘置き部とを接続するために両端に M6 のねじ切り加工を行ったジュラコン丸棒を示す。

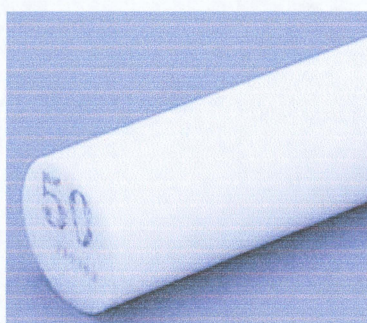


Fig.3.31 ジュラコン丸棒

Table.3.13 ジュラコン物性値

| Material | Polyacetal |
|---|-----------------------|
| Density | 1.41g/cm ³ |
| Tensile strength | 62MPa |
| Strain at break | 33% |
| Bending strength | 87MPa |
| Bend elastic constant | 2500MPa |
| Charpy impact strength | 5.5kJ/m ² |
| Deflection temperature under load(1.8MPa) | 100°C |

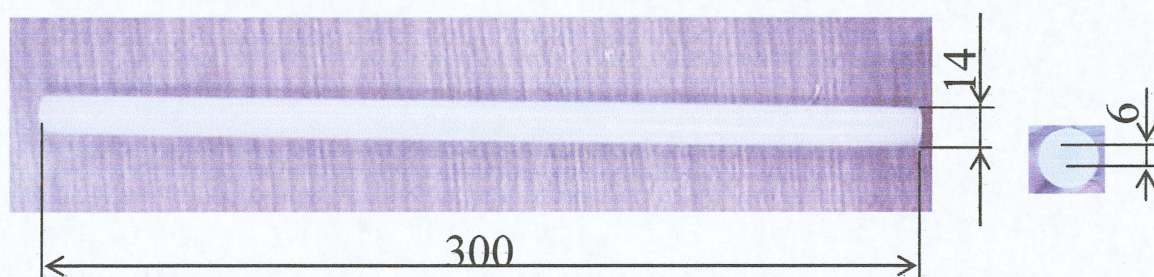


Fig.3.32 加工後のジュラコン丸棒

3.4.4 本体・ベルト固定具の製作

装置本体とベルトを固定するための部品を製作する。この部品は作業者の腕と作業工具の重量負荷が加わる装置本体を支えるため、大きな剛性が必要となる。また、溶接箇所から離れた位置の部品のため、本研究では金属材料の中でも軽量なアルミ合金 A5052 を採用した。採用した板厚 3mm のアルミ板を Fig.3.32 に示す。Table.3.14 にはアルミ合金 A5052 の物性値¹⁸⁾を示す。また、Fig.3.33 には製作したベルト固定具正面図を、Fig.3.34 には製作したベルト固定具側面図を示す。さらに、装置本体とベルトの固定部位を Fig.3.35 に示す。

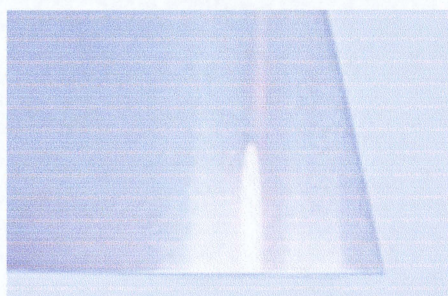


Fig.3.32 アルミ板

Table.3.14 A5052 の物性値

| | |
|----------------------|------------------------|
| Tensile strength | 225N/mm ² |
| Proof stress | 125N/mm ² |
| Spread | 18% |
| Hardness | 65HB |
| Density | 2.68 g/cm ³ |
| Conductivity | 35% |
| Thermal conductivity | 0.33 |

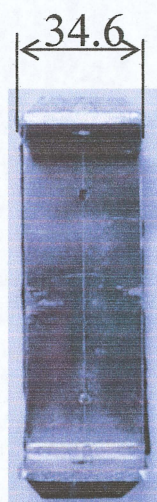


Fig.3.33 製作したベルト固定具正面

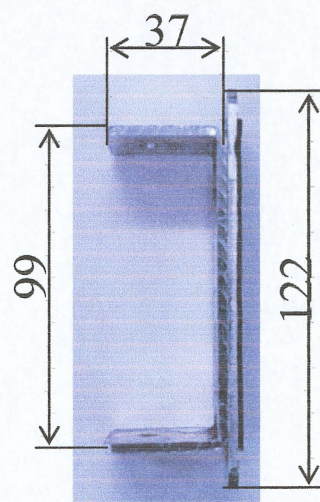


Fig.3.34 製作したベルト固定具側面

3.5 支援装置の組み上げ

これまでに設計した部品を組み合わせて、完成した支援装置全体図を Fig.3.36 に示す。また、支援装置装着図を Fig.3.37 に示す。支援装置全体の重量は 1.47kg で、そのうち体に装着するベルト部の重量は 0.5kg である。

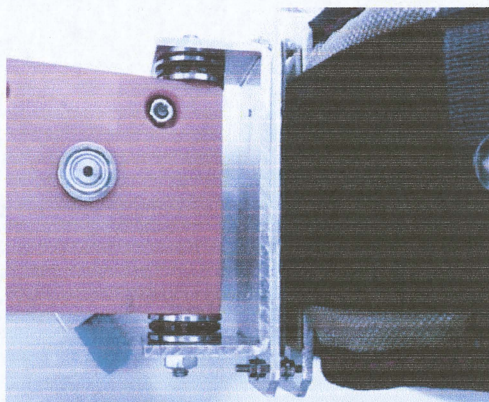


Fig.3.35 装置本体とベルトの固定部

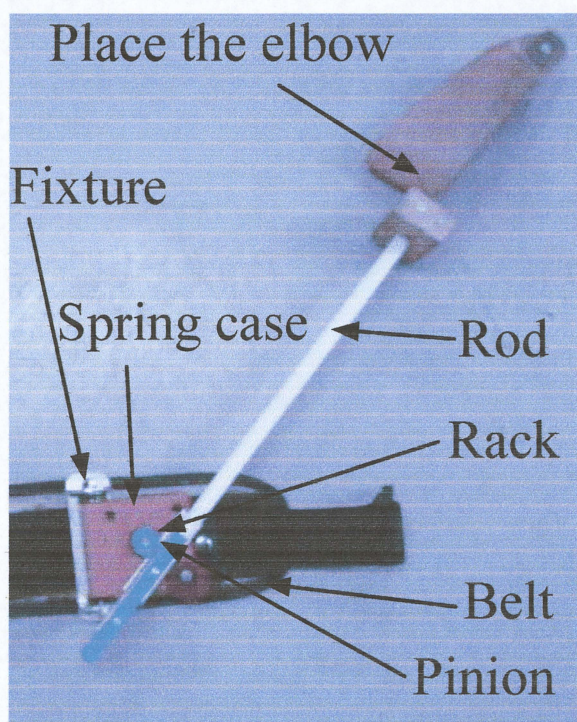


Fig.3.36 支援装置全体図

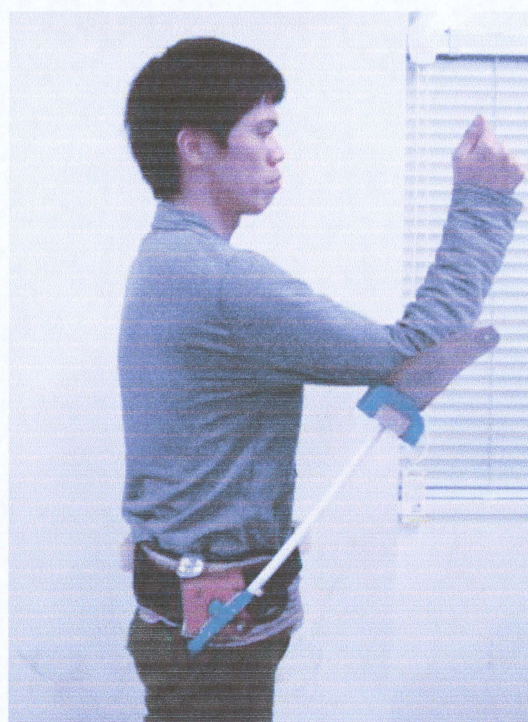


Fig.3.37 支援装置装着図

第4章

提案装置評価のための試行実験

本章では第3章で製作した溶接作業支援装置の評価のための試行試験を行う。4.1節では新たな負担の評価方法について述べる。4.2節では、作業動作の計測装置について述べる。4.3節では、現役の溶接工に対し上向き作業に支援装置を利用した際の肉体的負担に関する主観評価について述べる。

4.1.1 表面筋電位に関して

第2章では、モーションセンサを用いた計測と *BlessPro ver2.52*¹⁴⁾を用いた評価を行ったが、このソフトウェアでは提案装置を装着した場合の作業負担の評価はできない。そこで負担の軽減効果を評価するために、表面筋電位の計測を行うこととした。神経や筋の細胞が活動すると、それに伴って微弱な電気が発生することが知られている。筋肉の収縮は、大脳の運動中枢からの信号により、脊髄の運動を細胞である前柱細胞を興奮させ、運動神経のインパルスによって筋線維の細胞膜が脱分極を起こしてスパイク電位を放出する。これが筋電現象で、この筋の放電現象を記録したものが筋電図 (Electro-MyoGram; EMG) である^{22),23)}。皮膚の表面に電極を貼付して計測した表面の筋電でランダムノイズのような波形が現れる。表面筋電位は測定しようとする筋全体の状態を調べるのに有効である。表面筋電位は、電極に近い多数の筋線維から出る放電のベクトル和として示されるもので、その振幅は収縮に加わった筋線維の数と、それらの放電現象の和、つまり筋収縮の強さにほぼ比例する関係を示すといわれている^{24),25)}。提案装置による支援が加わることで作業に要する筋力が減少することが見込まれるため、計測される筋電位の差によって比較することができると考えられる。

4.1.2 作業に関わる筋

表面筋電位を計測するにあたって、上向き作業を行うのに必要な筋肉について述べる。作業動作に必要な筋は Fig.4.1 のようなものが挙げられる²⁶⁾。僧帽筋は上部が頸の後傾、肩に近づくと肩を上げる、もしくは後部に引く動作に使われる。三角筋の前部は腕を前方に、側部は横に、後部は後方に上げる動作に使われる。広背筋は肩や上体を後ろに後部に引きつける動作に使われる。

4.1.3 EMG 計測機器

表面筋電位の計測機器を Fig.4.2 に示す。計測部位の皮膚表面に貼付するバイオメトリクス社製の電極とアンプ一体型の EMG 検出センサ(SX230), およびバンド型のグラッドワイヤ, ディケイエイチ社製の EMG アンプ用のアイソレータ(PH-2501/8), 中継ボックスを用いた。EMG アンプの仕様について Table.4.1 で示す。また、EMG アンプで計測増幅された信号はコンピュータに A/D 変換して取り込んだ。

4.2.1 提案装置評価実験の目的

本実験では、開発した支援装置を用いた作業で肉体的負担の軽減効果があるのかを検証を行う。また、装置の着用によって作業動作に与える影響を探る。さらに、この実験により提案する支援装置の課題を明らかにすることを目的とする。

4.2.2 提案装置評価実験の環境

本実験の実験環境について説明する。計測機器として 2.2 節で述べた OPTOTRAK CERTUS と 4.1.3 項で述べた EMG 計測機器を用いる。作業現場を再現した室内での作業を行った。これは計測時期が冬であり、寒さで震え等により作業に要する正確な表面筋電位の計測ができないことを避けるためである。実験環境を Fig.4.3 に示す。第2章と異なるのは表面筋電位の計測機器が追加されたことおよび、被験者が右利きのため、進行方向が変わること、踏み台を使用せず、地面から溶接対象までの高さは

1800mm である。被験者の右側面から 4m の距離に赤外線受光センサを地面と垂直になるように設置した。赤外線受光センサは中央のセンサを座標原点として位置情報を収集した。Z 軸をセンサから計測対象方向が正方向となるようにとり、被験者の前後方向を X 軸とし前方向に正をとり、地面に垂直に Y 軸とし、上方向を正とした。動作計測のために作業者と作業道具に取り付けた赤外線発光マーカの配置と表面筋電位を計測するための EMG アンプの配置を Fig.4.4 に示す。赤外線発光マーカの取り付け位置は作業道具の握り手と先端部の 2 箇所、作業者の身体側面の頭、こめかみ、中指節点、手首、肘、肩、腰、膝、踝、爪先の 10 箇所、合計 12 箇所であり、作業者は作業道具を主に利き腕で扱うために利き腕側の側面の情報を収集するようにしている。EMG アンプの配置は支援装置が右側のみのアシストのため、右半身に配置する。腕を上げるための筋として僧帽筋、三角筋前部、腕を後部に引くのに要する筋として、三角筋後部と広背筋の 4 か所とした。また、作業の目標軌道を Fig.4.5 に示すように定めた。この軌道は第 2 章で計測した結果を基に作成した。

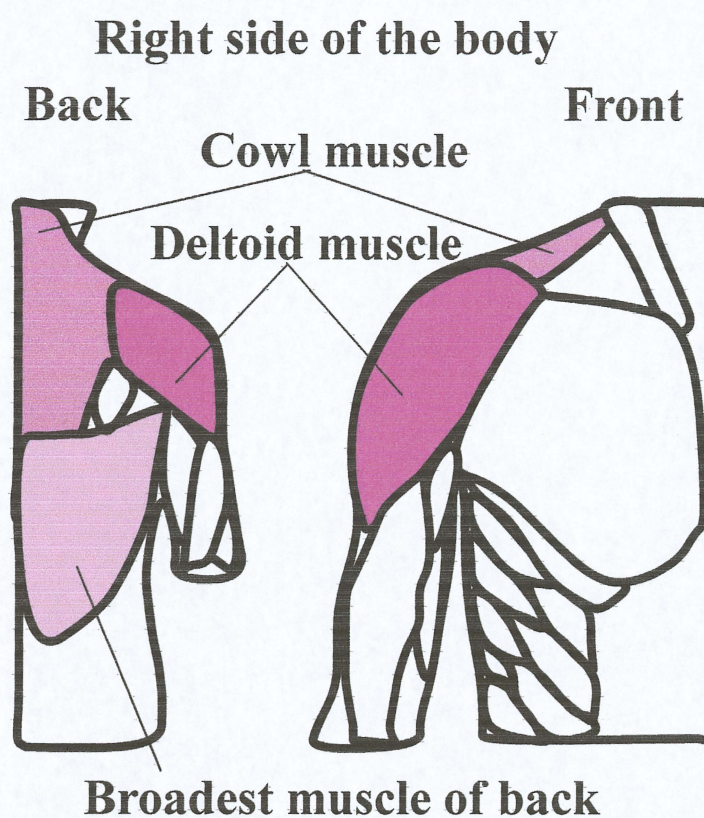


Fig.4.1 作業に関わりの深い筋

Table.4.1 EMG アンプの仕様

| | |
|-----------------|---------------------|
| Gain | 1000(60dB) |
| Band Width | 20-460Hz |
| Noise | less than 5 μ V |
| Input impedance | 10T Ω |

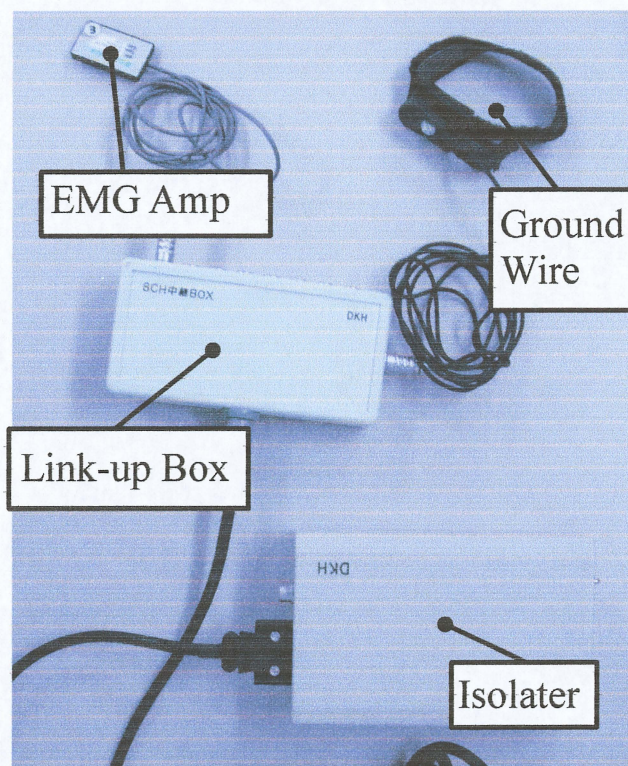


Fig.4.2 表面筋電位計測機器

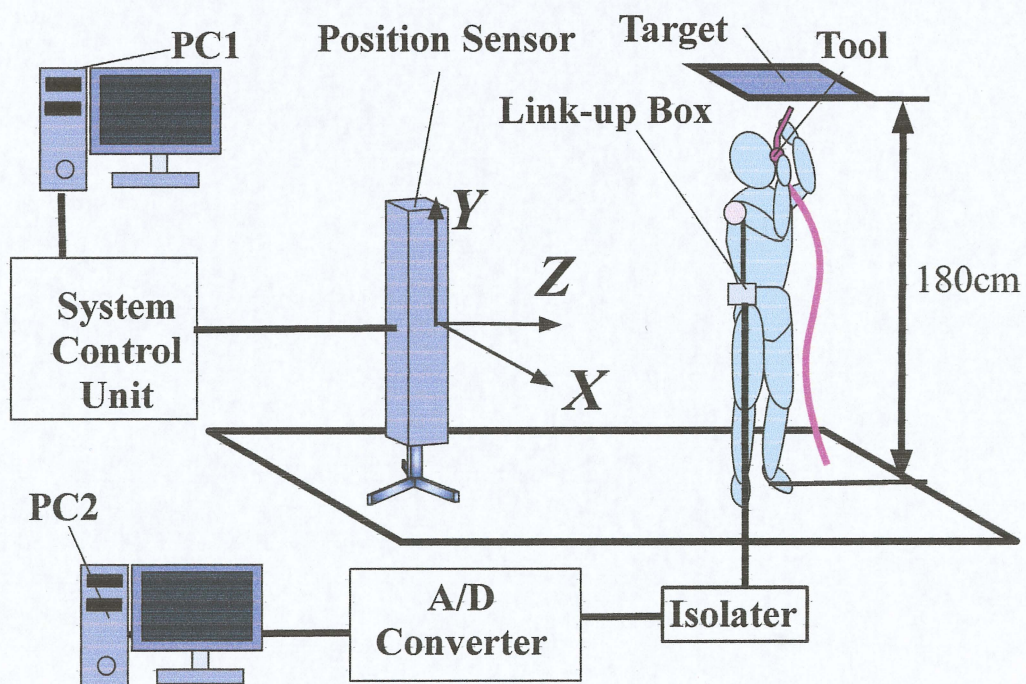


Fig.4.3 実験環境

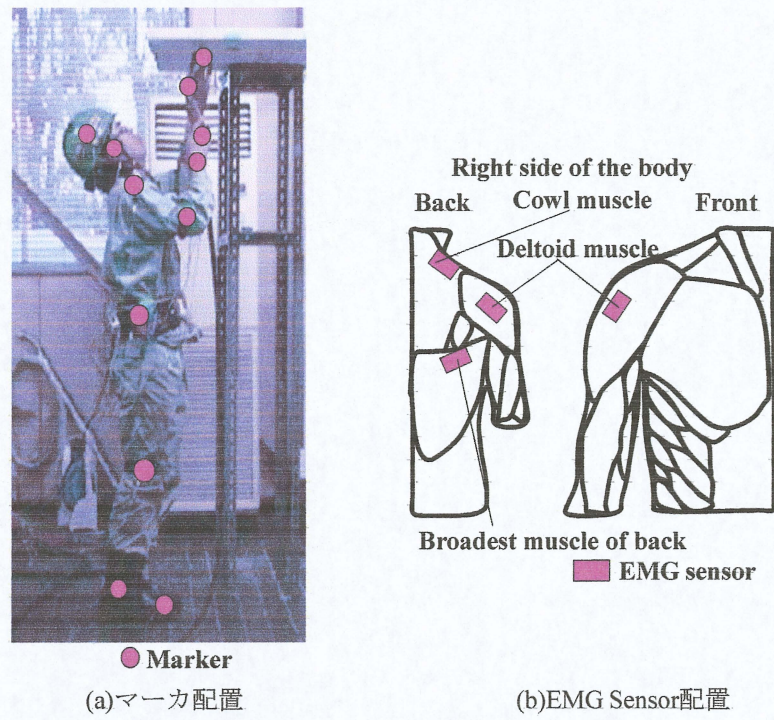


Fig.4.4 センサ類の配置

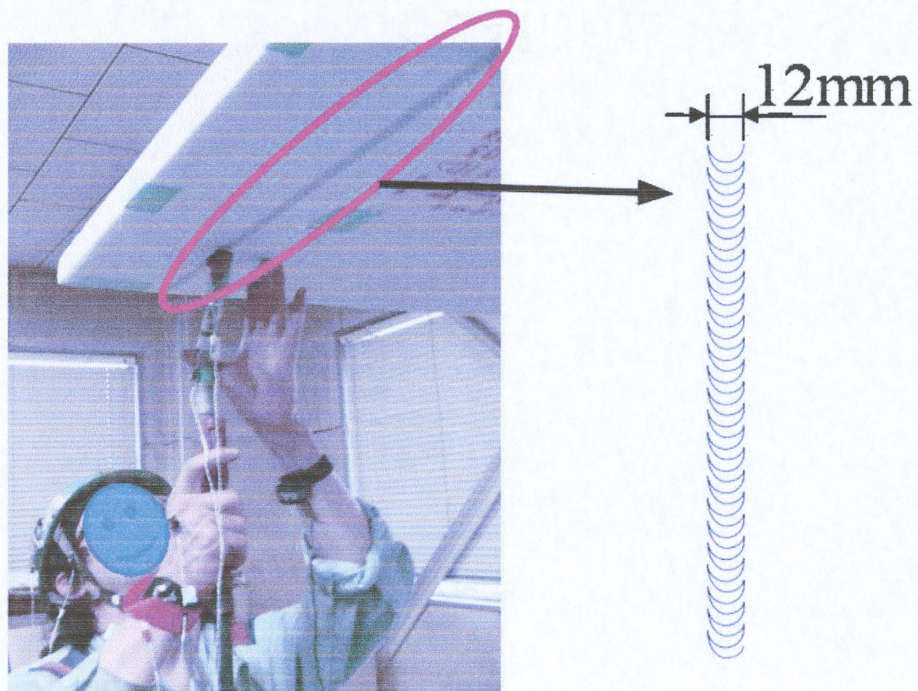


Fig.4.5 目標軌道

4.2.3 提案装置評価実験の条件

造船所で働く溶接作業従事者一名を被験者として計測を行った。被験者情報を Table.4.3 に示す。作業中の道具の運動を比較したいため、対象とする作業の中で、最も作業精度の必要とされる溶接作業の計測を行う。比較のために、従来作業と提案する支援装置に加え、外部動力の供給を必要としない上向き作業支援装置の例として、第1章で紹介したグレイパー¹³⁾を使用して情報収集実験を行う。モーションセンサのサンプリングタイムを 10msec、表面筋電位をサンプリングタイム 1msec で計測を行う。計測は計測順序を変えて4セット行った。その組み合わせについて Table.4.2 に示す。計測は作業毎に 30 秒間行い、各作業間には 30sec の休憩を挟んだ。この間に、支援装置の取り付け、取り外しを行う。また、2セット終わったところで 10 分間の休憩を挟んだ。

4.3.1 表面筋電位の解析

まず、計測した表面筋電位について述べる。解析に際し、僧帽筋を A_1 、三角筋前部を A_2 、三角筋後部を A_3 、広背筋を A_4 とする。計測した1セット目と、2セット目の作業時に計測した表面筋電位の原形を Fig.4.6 から Fig.4.8 に1セット目を Fig.4.9 から Fig.4.11 に2セット目の結果を示す。グラフは縦軸に EMG[mV]、横軸に時間[sec]を表している。この波形の振幅が大きいほど筋肉を働かせようとする脳からの信号が多く、筋肉を活動させようとしていることがわかる。ただし、部位により振幅の大きさは異なる傾向を示すため、同じグラフ内の別の部位の値と比較して小さい方が筋活動が小さいという解釈はできないことに注意する。同じ部位であれば EMG アンプの貼付状況が変わらない限り、グラフ間で比較できるため、Fig.4.6 の表す従来作業で激しい振幅の僧帽筋 A_1 と三角筋前部 A_2 は Fig.4.7 のグレイパーを用いた作業で振幅が小さくなり Fig.4.8 の提案装置を用いた作業ではさらに振幅が小さくなることが確認できる。僧帽筋 A_1 と三角筋前部 A_2 は腕と肩を上げるときに使われる筋であり、その部位の筋

活動量が減ったことがわかる。しかし、Fig.4.9 と Fig.4.10 において三角筋前部 A_2 はグレイパーの方が振幅が大きくなっている。三角筋後部 A_3 、広背筋 A_4 は肩や上腕を引くまたは、後部に押し出すような動作の時に働く筋である。提案装置やグレイパーは腕を下から押し上げる力で作業を支援するため、支援装置を使用するために従来の作業以上に腕を下げるように筋活動が増えるかを観察することができる。広背筋 A_4 は提案装置を用いた場合、1セット目でも2セット目でも従来作業やグレイパーを比較して振幅は小さくなった。ここまで、表面筋電位の原形を観てきたが細かな差異は判断し難いところがある。そのため、原形の値を全波整流し、各計測値を積算した値を筋電積分値 $iEMG[mV]$ として、表したものを Fig.4.12 示す。4つのグラフは、僧帽筋 A_1 、三角筋前部 A_2 、三角筋後部 A_3 、広背筋 A_4 の各部位の4回計測した値から求めた筋電積分値の平均値と標準偏差を表す。縦軸に筋電積分値 $[mV]$ 、横軸は作業の種類を示す。青に従来の作業を、黄色にグレイパーによる支援を行った作業を、赤に提案装置による支援を行った作業を示す。提案装置はいずれの部位でも低い値となり、筋活動は減少していることがわかる。特に、三角筋前部 A_2 の値は大幅に小さくなっている。グレイパーを用いても筋活動の減少効果はあると考えられる。しかし、広背筋 A_4 では値が従来作業を上回っている。これはグレイパーが前方方向へ倒すよりも装着者自身へ引き付けて使用した方がアシスト力が出るためだと考えられる。Table.4.4 に支援装置の効果による筋電積分値の軽減率として、従来作業の筋電積分値の平均値に対して、従来作業から各支援装置の筋電積分値を引いた値の割合を示す。最も効果の高かったのは三角筋前部 A_2 で従来作業の筋電積分値から 96%値が減少した。これはほとんど三角筋前部 A_2 の筋活動がないのと等しい。その他の部位にもばらつきはあるものの、平均値だけを見ると僧帽筋 A_1 で 66%、三角筋後部 A_3 で約 30%、広背筋 A_4 で 41%の筋電積分値の減少効果があった。この値から提案する支援装置は作業時の肩、腕を維持するのに必要な筋力を補い、負担を軽減する効果があると言える。

Table.4.2 計測順序の組み合わせ

| Order | Task1 | Task2 | Task3 |
|-------|--------|-----------------|-----------------|
| 1 | Normal | Graper | Proposed system |
| 2 | Normal | Graper | Proposed system |
| 3 | Normal | Proposed system | Graper |
| 4 | Normal | Proposed system | Graper |

Table.4.3 被験者情報

| | |
|--------------------|-----------|
| Age | 24 |
| Sex | Male |
| Height | 162cm |
| Weight | 53kg |
| Working Experience | 3years |
| Dominant Arm | Right Arm |

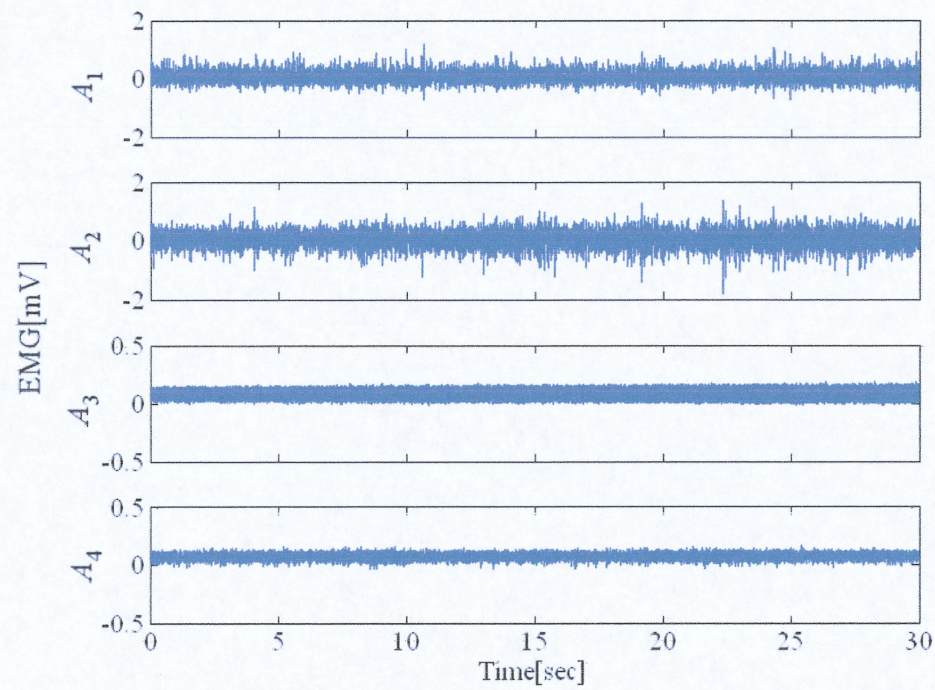


Fig.4.6 従来作業(1セット目)

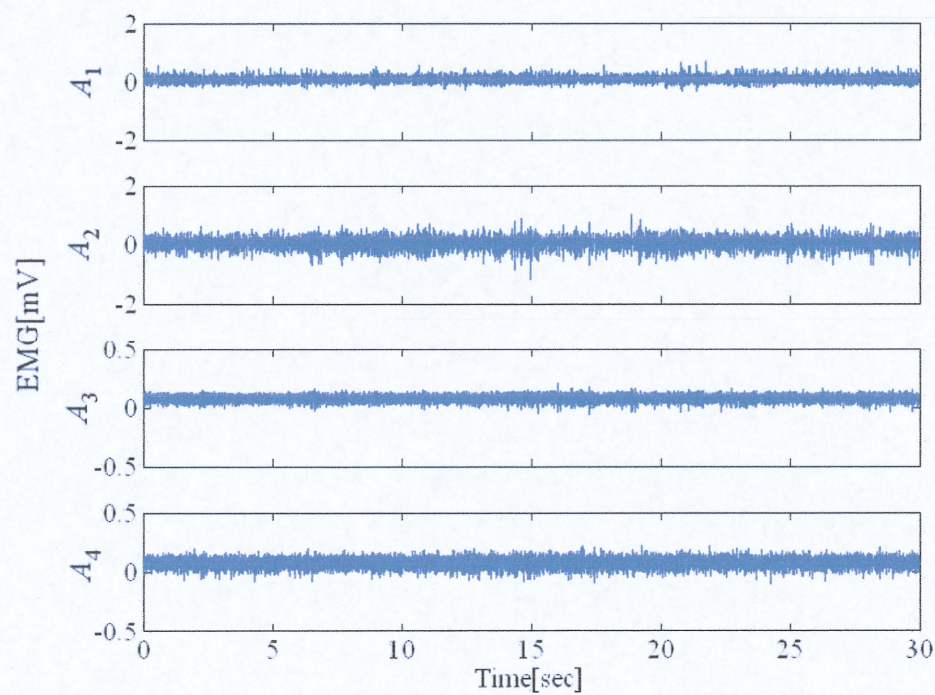


Fig.4.7 グレイパーを用いた作業(1セット目)

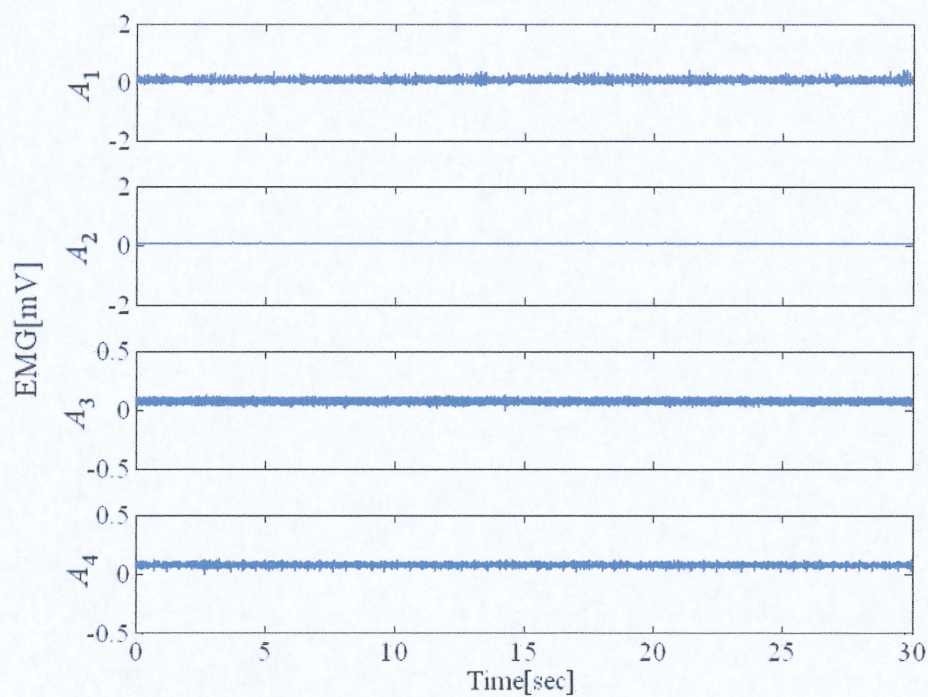


Fig.4.8 提案装置を用いた作業(1セット目)

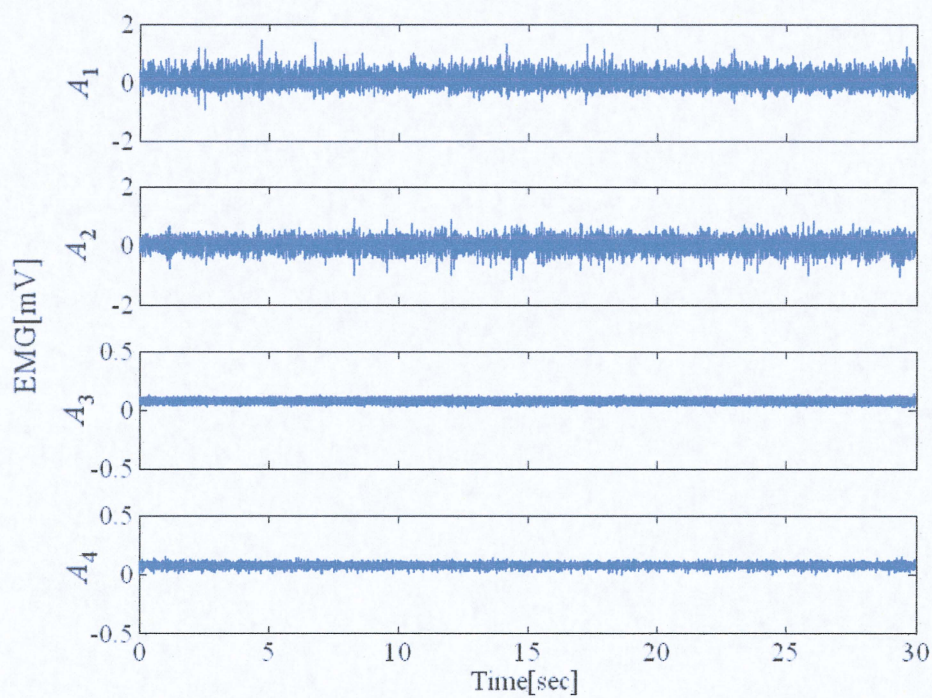


Fig.4.9 従来作業(2セット目)

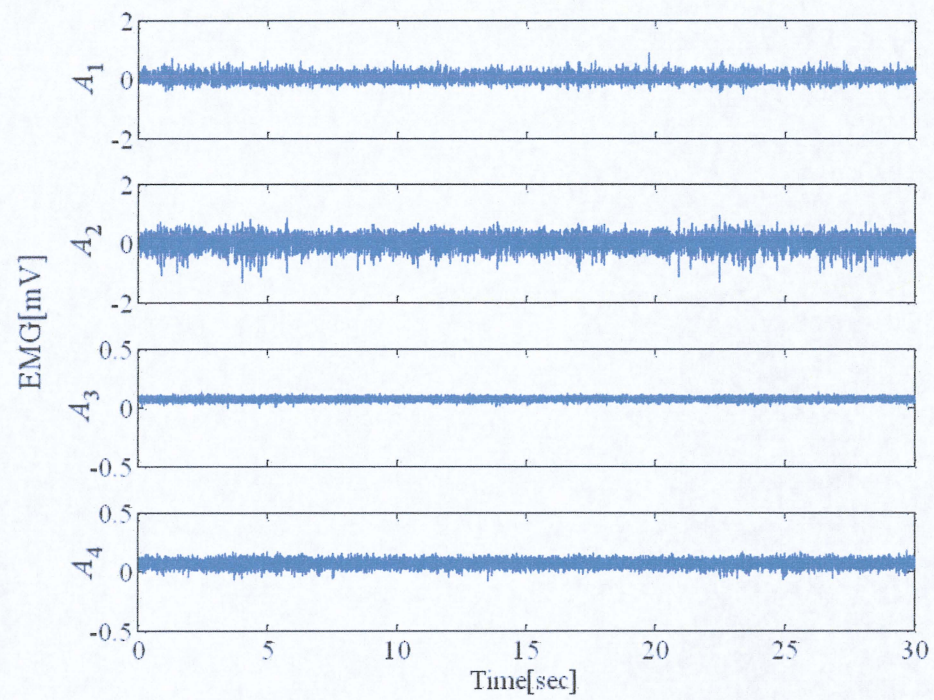


Fig.4.10 グレイパー(2セット目)

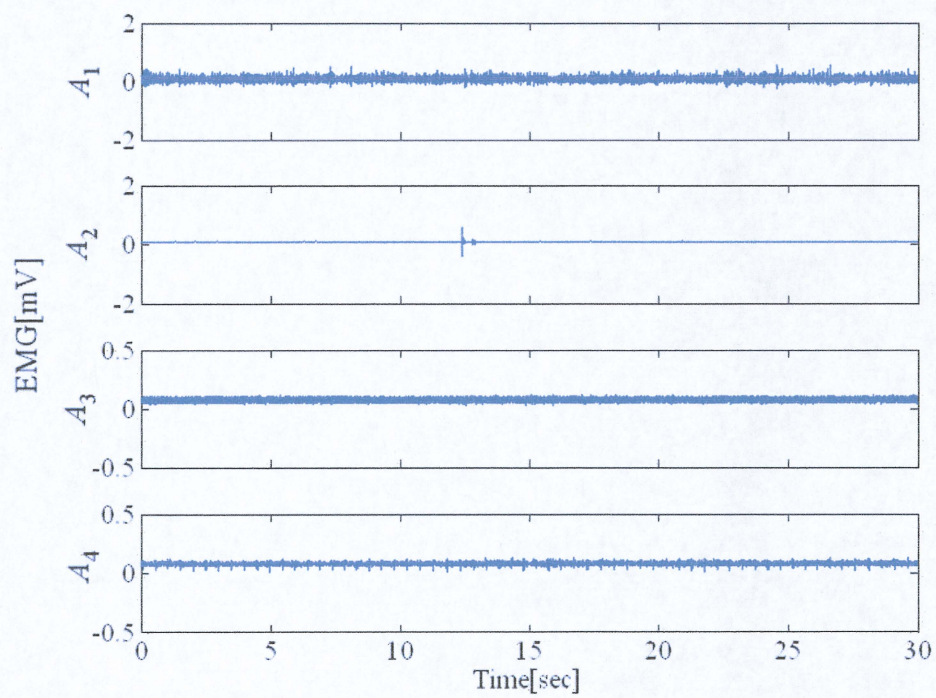


Fig.4.11 提案装置(2セット目)

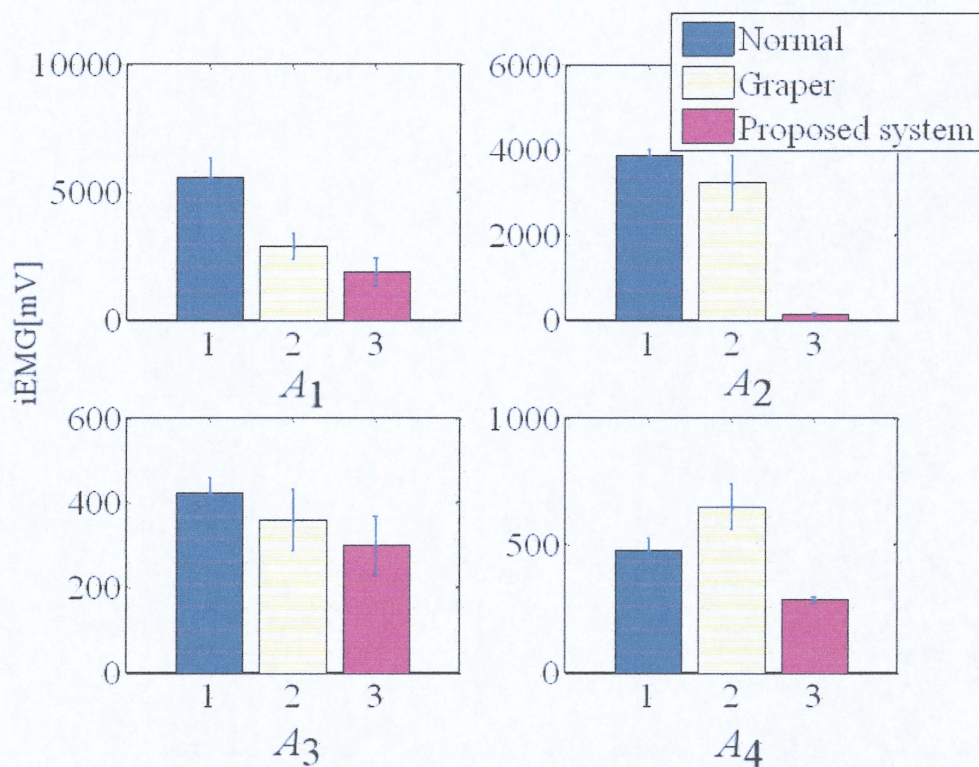


Fig.4.12 各作業の筋電積分値の平均と標準偏差

Table.4.4 従来作業に対する各支援装置の筋電積分値の軽減率

| Point | Graper | Proposed system |
|----------------|--------|-----------------|
| A ₁ | 0.481 | 0.657 |
| A ₂ | 0.165 | 0.961 |
| A ₃ | 0.153 | 0.299 |
| A ₄ | -0.366 | 0.406 |

4.3.2 作業に与える影響の評価

肉体的負担が作業に与える効果および支援装置が作業に与える効果を明確にするために、作業道具である溶接トーチの先端の動きについて着目する。被験者には前述したように Fig.4.5 のように目標とするトーチの先端の軌道を与えている。この目標の軌道と実際のトーチの軌道について比較評価する。まず、1 セット目に計測したトーチ先端の動きの軌跡を Fig.4.13 に示す。グラフは縦軸が X 軸方向、横軸が Z 軸方向を表す。青の実線がトーチ先端の軌跡で、緑の二本線は 12mm あり、目標軌道の幅を

示している。赤の一点差線は目標軌道の中心線を示す。従来作業に比べグレイパーを用いた作業軌跡は少し荒いがあまり違いはないと考えられる。提案装置を用いたときの軌道は目標軌道の幅の範囲内で動いている。全体の移動距離（軌跡の長さ）としても短めである。トーチ先端の移動距離として、Fig.4.14 から Fig.4.16 に示す。グラフの縦軸に移動距離[mm]を、横軸に4セットあるうちの何セット目の作業かを示す。また、4つの値を最小二乗法で線形近似した直線と、その直線の方程式を記入してある。まず、作業を重ねることによる移動距離に与える影響について考える。従来作業とグレイパーでは作業回数を重ねるごとに値が減少している。これは各値を線形近似した直線の方程式の傾きがマイナスであることから明確にわかる。また、提案装置の各値は他の作業と比べると低い。しかし、作業回数を重ねても値は減少する傾向がないことが読み取れる。これは作業を重ねても支援装置による支援効果により負担がかかりにくく作業に影響を与えなかったと考えられる。

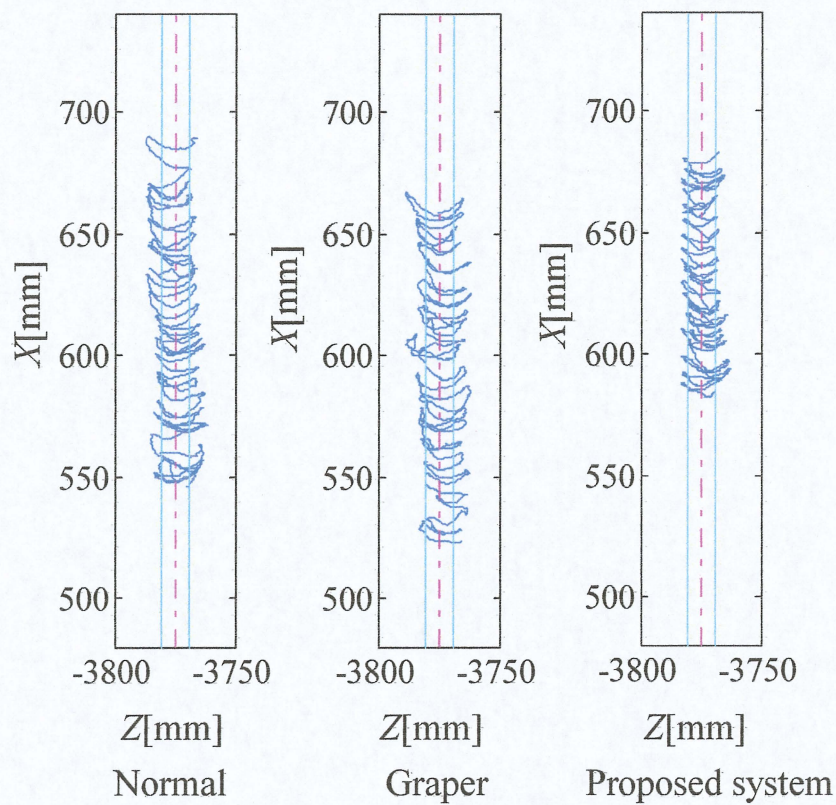


Fig.4.13 溶接トーチ先端の軌跡

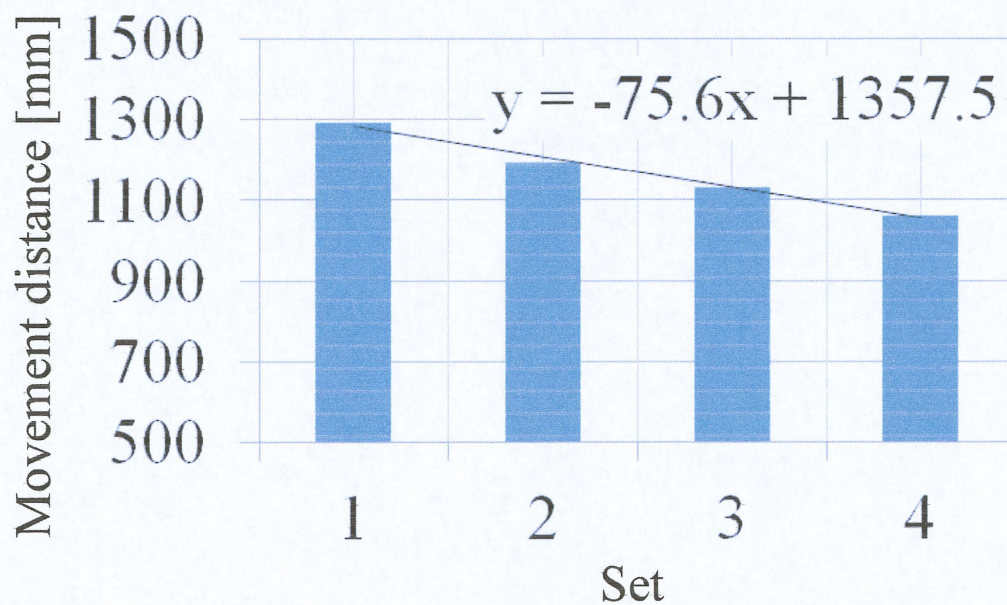


Fig.4.14 作業を重ねるごとのトーチ移動距離の変化（従来作業）

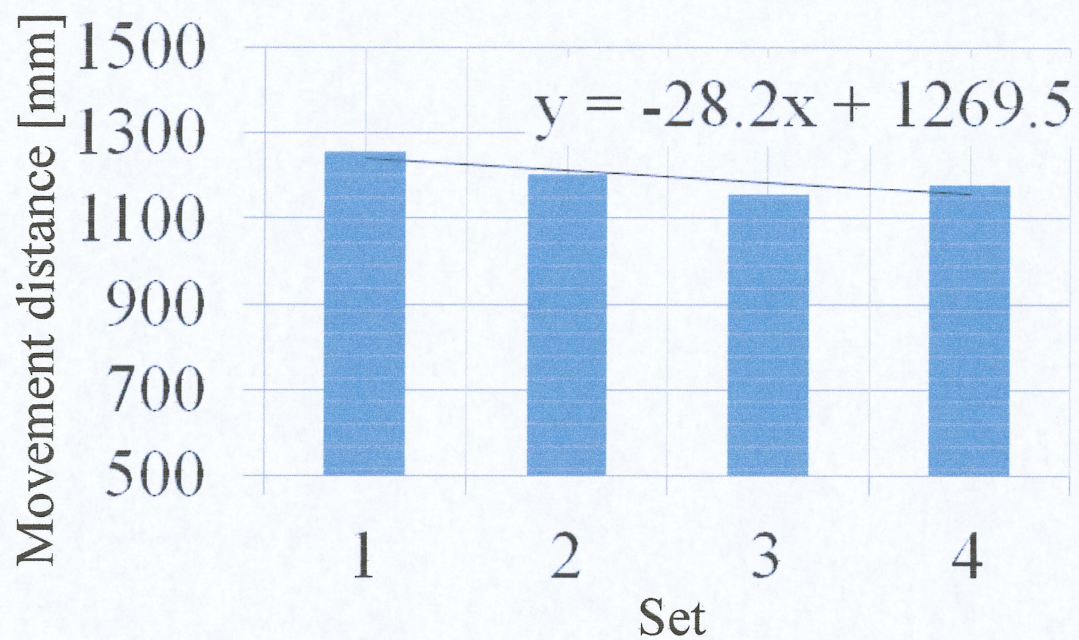


Fig.4.15 作業を重ねるごとのタッチ移動距離の変化（グレイパー）

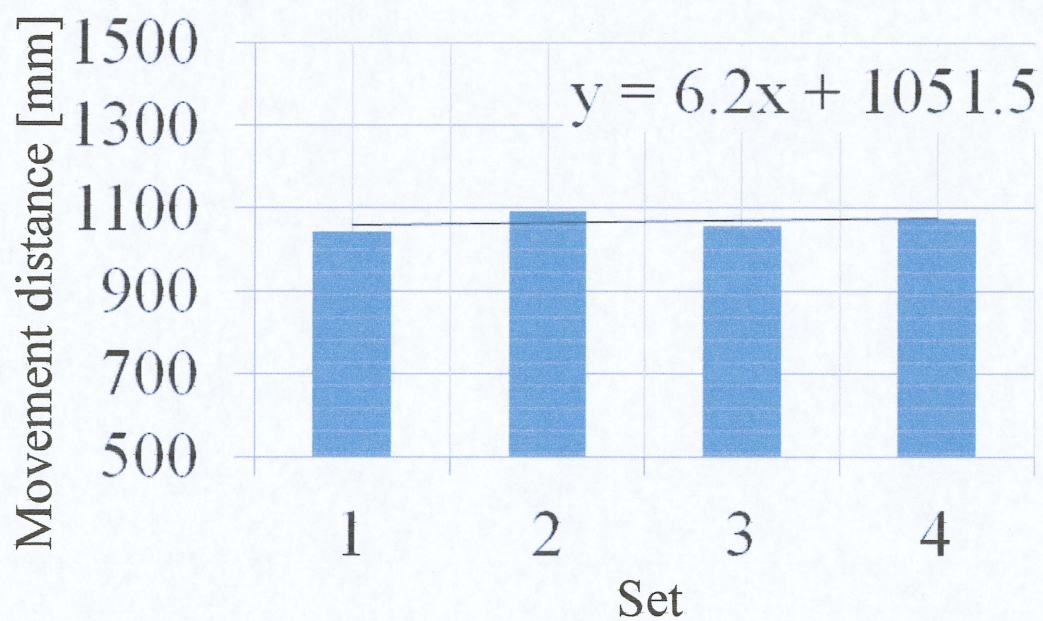


Fig.4.16 作業を重ねるごとのタッチ移動距離の変化（提案装置）

4.3.3 提案装置試用による主観評価

提案装置を用いた溶接工の主観評価として Fig.4.17 示す人体図に負担を感じる部位を記入する方法を用いた。被験者の情報を Table.4.5 被験者には各作業において日ごろ作業を行う際に、負担を感じる部位について記入して頂いた。各作業で一人でも負担を訴えている部位について結果について Fig.4.18 に示し、このうち、被験者の半数の3名以上の方が負担とを感じる部位を Fig.4.19 に示す。主に頸と利き腕の肩周りが負担を感じていることがわかった。また、2名以上の方が負担の減少を感じた部位として、Fig.4.20 に示す。肩周りが負担の減少している部位として挙げられている。また、これとは逆に提案機器の使用による負担の増加が2名以上あった部位はなかった。負担の増加の報告は腰に負担を抱える人で腰部の負担が増加したとの報告が1名、研磨作業で右上腕上部に増加を挙げた方が1名いた。グラインダを用いた研磨作業の動きは他の動きより激しいため、今回提案する支援装置では可動域が足りなかったと考える。次に、溶接、ガウジング、研磨作業において、提案装置を使用した際に作業精度が「1.上がった、2.変化しない、3.下がった」という3つの中から選ぶという形でアンケートをとった結果を Table.4.6 に示す。いずれの作業においても作業精度は「3.下がった」という意見が半数以上を占めた。これは作業現場の環境、特に溶接対象の設置高さが異なることと、作業により作業姿勢の特徴がわかるために、現在の装置の可動域では不足していることが問題となった。また、肘置き部が肘を乗せるだけの構造となっており、腕を外しやすいことが作業中の腕の拘束感がなく不安定に感じるということが問題であった。

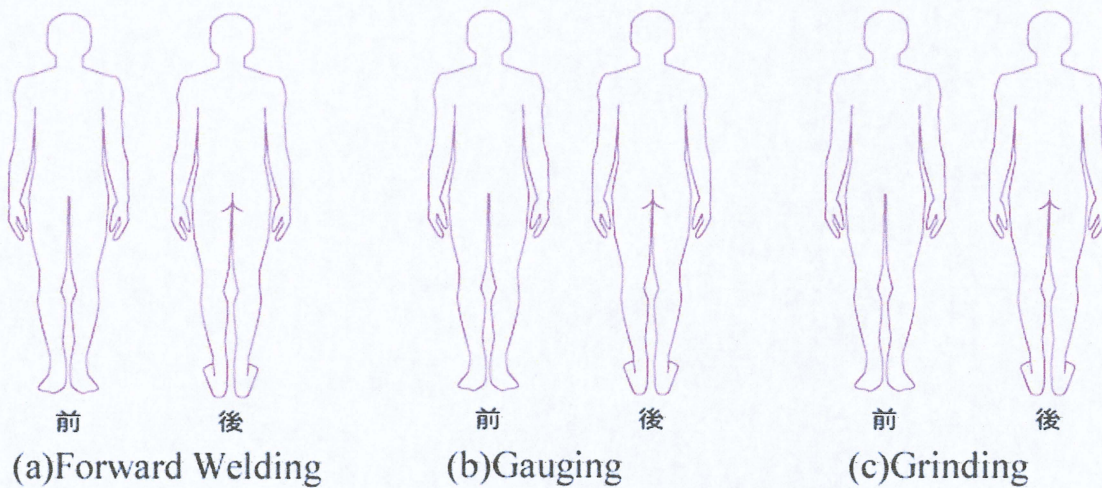


Fig.4.17 溶接支援装置用の主観評価用図

Table.4.5 提案装置試用試験の被験者情報

| Subject | A | B | C | D | E | F |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Age | 21 | 23 | 24 | 27 | 36 | 44 |
| Sex | Male | Male | Male | Male | Male | Male |
| Height[cm] | 173 | 166 | 162 | 175 | 169 | 181 |
| Weight[kg] | 78 | 52 | 53 | 62 | 65 | 88 |
| Working Experience[year] | 3 | 4.5 | 3 | 7.5 | 11 | 13 |
| Dominant Arm | Right | Right | Right | Right | Right | Right |
| Trial period[hour] | 1 | 1 | 12 | 12 | 1 | 4 |

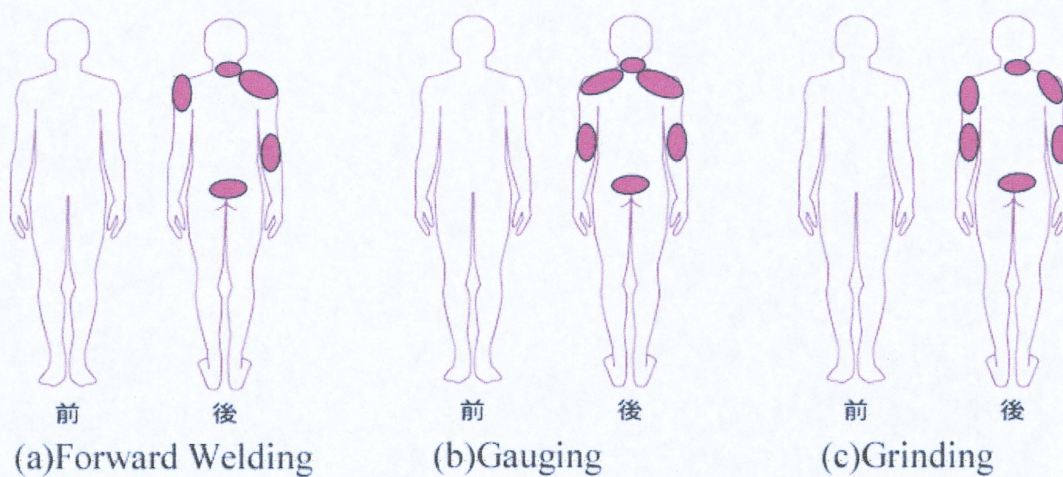


Fig.4.18 従来作業による負担の部位

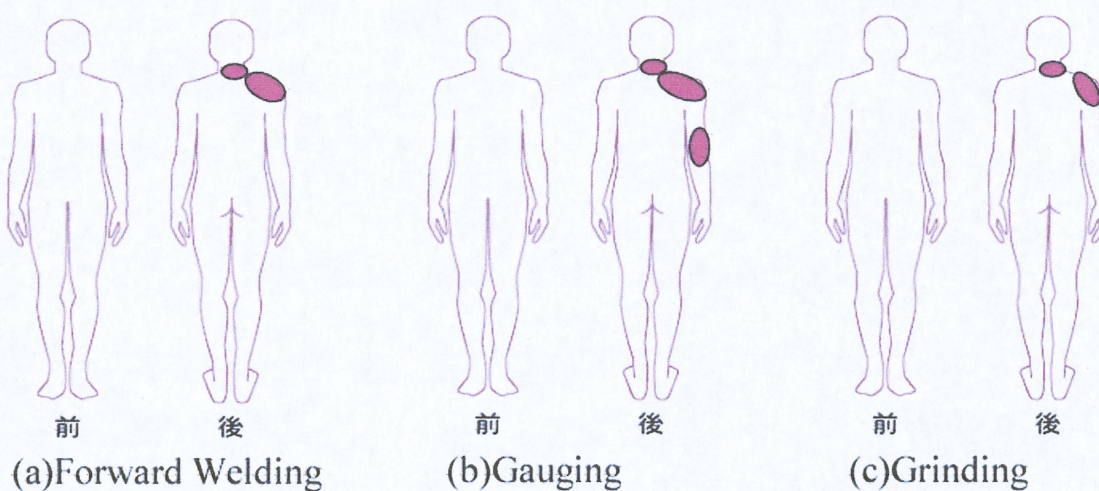


Fig.4.19 従来作業により負担を感じる人が多い部位

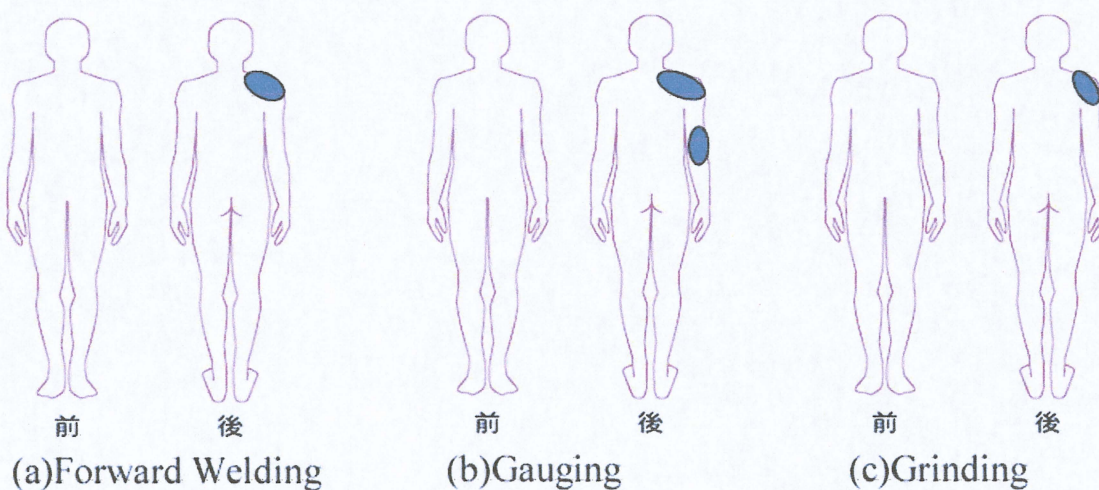


Fig.4.20 提案装置の着用により負担が減少したと感じた部位

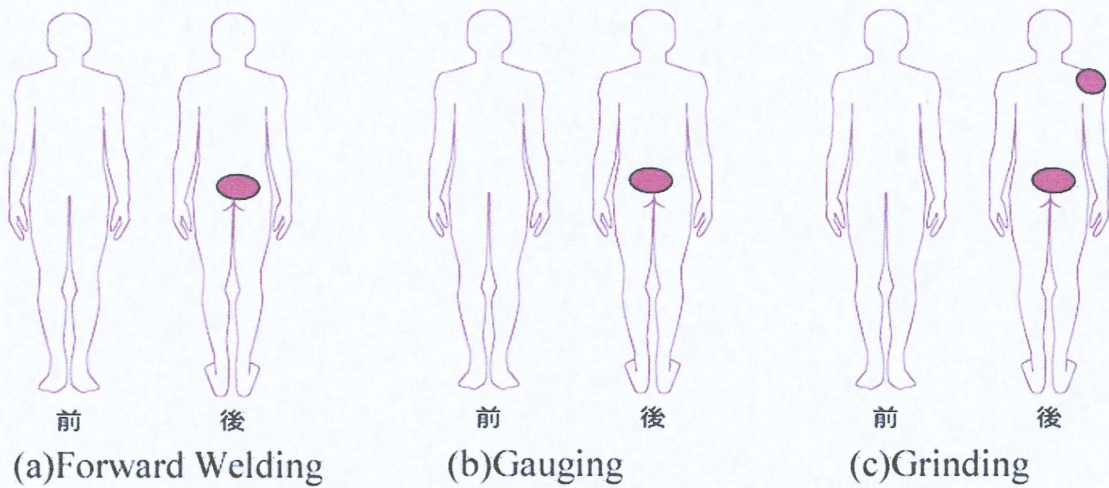


Fig.4.21 提案装置の着用により負担の増加を感じた部位

Table.4.6 作業精度についてのアンケート結果

| Accuracy | Up | Remain the same | Down |
|----------|----|-----------------|------|
| Welding | 0 | 2 | 4 |
| Gauging | 0 | 3 | 3 |
| Grinder | 0 | 2 | 4 |

第5章

結論

5.1 まとめ

本研究では造船所において上向きで行われる溶接作業を対象として、ゼンマイばねの復元力を動力源に用い、外部動力の供給が不要な溶接支援装置を提案し上向き作業を行う溶接工の肉体的な負担を改善することによる作業効率向上を目的とした。

まず、造船作業で対象とする作業環境の調査および作業動作計測を行った。動作計測ではモーションセンサを用いて溶接工の各関節の変位および作業道具の動きを計測した。その結果、作業時は手先以外の動作範囲は狭く、作業開始時の姿勢を維持することがわかった。また、作業時の姿勢の情報と作業負担評価ソフト *Blesspro* を用いて姿勢を維持するのに必要な各関節周りに働くモーメントを算出した。最も負担が大きかった部位は肩周りであり、次いで、肘、首という結果が得られた。これは溶接工が負担を訴える部位と一致した。また、肩腕で道具を保持した場合の肩周りに働くモーメントを求めた。

次に、解析した肉体的な負担評価の情報を基に、効果的に負担を軽減できる機構を有し、尚且つ作業環境に適した溶接支援装置の検討を行った。この支援装置は主に肩の負担を軽減する効果が高い装着型の装置とした。ぜんまいバネを採用し、巻かれたバネが元に戻ろうとする力が装置の動力源となる。そのため、外部動力の供給を必要とせず、装着しながらの移動も自由に行える。ベルトの両脇にバネ駆動機構を設け、装着者の肘を支える軸と連結した。軸とバネ駆動機構の連結部にはラック&ピニオンを備え、軸の運動によりバネが変形し肘を押し上げる力を発生させる。この力によって装着者の腕の重量を支え、作業姿勢を維持するための筋力を軽減し、人体に加わる

負担を分散させることができる。

開発した支援装置の評価のため、造船所で働く現役の溶接工を対象として実際の作業現場に製作した作業支援装置を試験的に導入し、表面筋電位センサによって筋電位の計測を行い、筋活動量を評価した結果、肩周りの筋活動量の減少を確認した。また、溶接工に対する主観評価として作業支援による負担の軽減効果および作業性への影響についての主観調査を行った。その結果、肉体的負担の減少を実感したという結果が得られた。

5.2 今後の課題

本研究の今後の課題としては以下のことが挙げられる。

- ・ 本研究で開発した支援装置において、肉体的負担の軽減効果は得られたが、作業者は作業精度を維持して作業を行えるまでには至っていない。これは作業者の作業姿勢の特徴の違いを把握しておらず、個々に対応するには装置の調整の範囲が限られているため、個々の作業姿勢の特徴を考慮し、可動域を備える必要がある。
- ・ 対象とする作業では、作業道具の重量が異なる。現在の装置ではアシスト力を変えるための調整はバネの巻数に依存しているがラックとピニオンのかみ合いを外し調整する必要があるため、作業中に容易にアシスト力を切り替えられる機構が必要である。
- ・ 現在の装置は作業道具の持ちかえのために、腕の下ろしやすさを重視した肘置き形状を採用している。しかし、作業中の腕に対する装置の拘束力が足りないことで作業精度が落ちているとも考えられる。腕を装置に固定・離脱を容易にできる機構を追加することで、

参考文献

- 1) 日本造船工業会：「Shipbuilding」, <http://www.sajn.or.jp/pdf/shipbuilding.pdf>
- 2) 日本溶接教会溶接部会技術委員会：「業種別に見た各種溶接材料の現状と将来に関する調査」, 溶接技術, 10月号, pp.80-88, (2011)
- 3) 長谷川雅人, 五十嵐宏, 大野宏, 平石誠, 馬場大輔, 田村信, 菅野明宏：「溶接技術の高度化に関する調査研究」, 工業技術研究報告書, 第38号, (2009)
- 4) 日本溶接協会：「社団法人 日本溶接協会 60年史」, 日本溶接協会資料, pp.85-88, (2009)
- 5) 村川英一：「溶接力学に関する研究動向一期待される溶接力学の役割一」, TechnoMar, 第786号, pp.908-911, (1993)
- 6) 嵯峨常生, 中西祐二, 石垣喜久雄, 大塚輝生, 小山実, 小桝栄次, 田村和夫, 辻信宏, 豊田善敬, 橋本広明, 山名式雄：「機械工作1」, 実教出版株式会社, (2003)
- 7) 奥本泰久, 中馬越幸次：「バーチャルヒューマンモデルと感性工学による作業性評価」, 溶接学会論文集, 第21巻, 第2号, pp.234-242, (2003)
- 8) 日本造船工業会造船業高齢者雇用推進委員会：「造船業高齢者雇用推進ガイドライン こんなにある高齢者活躍の場 ～安全な職場づくりにベテランの技を～」, (2010)
- 9) 小林恭：「夏の作業を快適に～ファン付き作業ウェア『空調服』の改良～」, 第28号, p.1, (2008)
- 10) 筑波大学大学院システム情報工学研究科山海研究室：「ロボットスーツ HAL」, http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/r_hal.php
- 11) 小林宏：「肉体労働支援用マッスルスーツ」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1P1-N09, (2007)
- 12) 八木栄一, 原田大輔, 小林雅章：「農作業用持ち上げ動作を支援するための空気圧駆動上肢パワーアシストシステムの開発」, 日本機械学会論文集(C編), 第75巻, 第755号, pp.2036-2043, (2009)
- 13) 協和テクノ株式会社：「ぶどう等の作業補助具 グレイパー」, http://www2s.biglobe.ne.jp/~kyowwa_t/hojyogu.html
- 14) 瀬尾明彦：「腰部負担軽減のための作業改善支援ソフト」, 労働科学第74巻, 9号, pp.377-345, (1998)
- 15) 文部省体育局：「昭和63年度体力・運動能力調査報告書」, (1988)
- 16) 林洋次, 堤茂雄, 三上勝, 中川恵二, 大塚康正, 石井暁, 岩崎利信, 内海明, 坂田充弘, 笹平篤生, 鈴木賢二, 早川忠憲, 平木和秋, 堀池徹, 宮本滋, 村田和雄：「機械設計1」, 実教出版株式会社, (2003)
- 17) 林洋次, 堤茂雄, 三上勝, 中川恵二, 大塚康正, 石井暁, 岩崎利信, 内海明, 坂田充弘, 笹平篤生, 鈴木賢二, 早川忠憲, 平木和秋, 堀池徹, 宮本滋, 村田和雄：「機械設計2」, 実教出版株式会社, (2004)
- 18) JIS 機械工学便覧編纂委員会：「JIS 機械工学便覧」, 機械協会株式会社, (1963)
- 19) 吉沢武男, 堀幸夫, 富家道, 蓮見義久, 中島尚正, 村上存：「新編 JIS 機械製図(第4版)」, 森北出版株式会社, (2006)

-
- 20) 阿部龍蔵：「新物理学ライブラリ=2 力学[新訂版]」,株式会社サイエンス社,(1975)
 - 21) 通商産業省工業技術院生命工学工業技術研究所編著：「設計のための人体寸法データ集」,株式会社日本出版サービス,(1996)
 - 22) R.F.Chandler：「Investigation of Inertia Properties of the Human Body」,AMRL-TR74-137,(1975)
 - 23) 加藤象二郎, 大久保堯夫：「初学者のための生体機能の測り方」,株式会社日本出版サービス,(1999)
 - 24) 橋本邦衛,遠藤敏夫：「生体機能の見かた」,株式会社日本出版サービス,(1973)
 - 25) 吉武康英：「生体信号処理のレシピ」,大分看護科学研究,4(1),pp.27-32,(2003)
 - 26) 竹内修二：「好きになる解剖学 Part2」,講談社,(2005)
-

謝辞

本研究を進めるにあたり、三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 池浦良淳教授には研究に関する有益な御助言を頂き、深く感謝致します。厚く御礼申し上げます。

また、御多忙の中本論文を査読して頂くとともに、多数のご教示、ご助言を賜りました三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 矢野賢一教授に厚く御礼申し上げます。

また、三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 早川聡一郎准教授には終始多大なる御指導、御鞭撻を行って頂き、深く感謝致します。心より御礼申し上げます。

さらに、実験装置の製作にあたり、親身な御協力、御尽力、アドバイスをくださった澤井秀樹技官に厚く御礼申し上げます。

そして、ユニバーサル造船株式会社生産技術研究室 篠原利昭主席研究員には浅学な私に対し多数のご教示、ご助言を賜り、心より御礼申し上げます。

なお、本稿作成は、株式会社ユニバーサル造船からの情報提供や御助言があったことにより可能となりました。ここに、深甚なる謝意を表します。

本研究を行うに際しまして、御多忙の中実験に協力していただきました被験者の皆様には貴重な時間を割いていただき、厚く御礼申し上げます。

そして、先輩方、同期各氏、後輩各氏のおかげで、充実した研究室生活を送ることができました。これら各位のご指導、ご協力に対し、心より御礼申し上げます。

最後に、学部・修士の間、より勉強をしたいという私の我儘に対して快く賛同して頂き、また惜しみない援助を送ってくださった家族のお陰で充実した素晴らしい勉強・研究生活を送ることができました。感謝の気持ちを述べることで謝辞の最後とさせていただきます。
